



2010.
GODINA
LIII



MATERIJALI 3 I KONSTRUKCIJE

MATERIALS AND STRUCTURES

ČASOPIS ZA ISTRAŽIVANJE U OBLASTI MATERIJALA I KONSTRUKCIJA
JOURNAL FOR RESEARCH OF MATERIALS AND STRUCTURES



DRUŠTVO ZA ISPITIVANJE I ISTRAŽIVANJE MATERIJALA I KONSTRUKCIJA SRBIJE
SOCIETY FOR MATERIALS AND STRUCTURES TESTING OF SERBIA

MATERIJALI I KONSTRUKCIJE

MATERIALS AND STRUCTURES

ČASOPIS ZA ISPITIVANJE I ISTRAŽIVANJE U OBLASTI MATERIJALA I KONSTRUKCIJA
JOURNAL FOR RESEARCH IN THE FIELD OF MATERIALS AND STRUCTURES

IZDAVAČ:

Društvo za ispitivanje i istraživanje
materijala i konstrukcija Srbije

GLAVNI I ODGOVORNI UREDNIK:

Prof. dr Radomir FOLIĆ, dipl.inž.,
Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

REDAKCIONI ODBOR:

Prof. dr Radomir FOLIĆ, dipl.inž.,
glavni i odgovorni urednik
Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

Prof. dr Mirjana MALEŠEV, dipl.inž.,
zamenik odgovornog urednika,
Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

Prof. Lazar JOVANOVIĆ, dipl.inž.,
Beograd, Vrnjačka 9

Prof. dr Aleksandar PROKIĆ, dipl.inž.,
Građevinski fakultet, Subotica

Dr Ksenija JANKOVIĆ, dipl.inž.,
Institut IMS, Beograd

Dr Zoran BAČKALIĆ, dipl.inž.tehn.
"Polet", Novi Bečej

Mr Branislav VOJINOVIĆ, dipl.inž.,
Braće Ribnikar br. 15, Beograd

Dr Gordana Topličić-Ćurčić, dipl.inž.
Građevinsko-arhitektonski fakultet, Niš

ADRESA REDAKCIJE:

Društvo za ispitivanje i istraživanje
materijala i konstrukcija Srbije
11000 Beograd, Kneza Miloša 9
Telefon: 011/3242-589

RECENZENTI:

Konačnu recenziju izvršio je Redakcioni odbor časopisa
na osnovu recenzentskih izveštaja

TEHNIČKI UREDNIK:

Stoja TODOROVIC

NASLOVNA STRANA:

Naguravanje grede zadnjeg raspona preko pomoćnih
stubova na mostu preko reke Save "Ada Ciganlija" u
Beogradu

TIRAŽ: 200 primeraka

Štampanje ovog broja pomogla je Inženjerska komora
Srbije.

Ovaj časopis primaju članovi Društva za ispitivanje i
istraživanje materijala i konstrukcija Srbije

PUBLISHER:

Society for Materials and Structures Testing
of Serbia

EDITOR AND CHIEF:

Prof. dr Radomir FOLIC, Civ.Eng.,
Faculty of Technical Science, Novi Sad

EDITORIAL BOARD:

Prof. dr Radomir FOLIC, Civ.Eng.,
editor and chief
Faculty of Technical Science, Novi Sad

Prof. dr Mirjana MALESEV, Civ.Eng.,
Faculty of Technical Science, Novi Sad

Prof. Lazar JOVANOVIĆ, Civ.Eng.,
Belgrade, Vrnjacka 9

Prof. dr Aleksandar PROKIC Civ.Eng.,
Faculty of Civil Engineering, Subotica

Dr Ksenija JANKOVIC, Civ.Eng.,
Institute IMS, Belgrade

Dr Zoran BAČKALIĆ, dipl.inž.tehn.
"Polet", Novi Bečej

Mr Branislav VOJINOVIĆ, dipl.inž.,
Braće Ribnikar br. 15, Beograd

Dr Gordana Toplicic-Curcic, Civ.Eng.,
Faculty of Civil Engineering and Architecture, Nis

THE ADDRESS OF THE EDITORIAL-STAFF:

Society for Materials and Structures Testing of Serbia
11000 Belgrade, Kneza Milosa 9
Telephone: 381 11/3242-589

REVIEWERS:

The review of papers done by the Editorial Board on the
reviewer's report

TECHNICAL EDITOR:

Stoja TODOROVIC

COVER:

Lunching of the end span beam over contemporary column for
bridge over the Sava River "Ada Ciganlija" in Belgrade

CIRCULATION: 200 examples

This number was published thanks to the financial support
of the Engineering Chamber of Serbia.

This Journal receive all the members of Society for
Materials and Structures Testing of Serbia

DRUŠTVO ZA ISPITIVANJE I ISTRAŽIVANJE MATERIJALA I KONSTRUKCIJA SRBIJE
 SOCIETY FOR MATERIALS AND STRUCTURES TESTING OF SERBIA

MATERIJALI I KONSTRUKCIJE

MATERIALS AND STRUCTURES

ČASOPIS ZA ISPITIVANJE I ISTRAŽIVANJE U OBLASTI MATERIJALA I KONSTRUKCIJA
 JOURNAL FOR RESEARCH IN THE FIELD OF MATERIALS AND STRUCTURES

SADRŽAJ

Julio GARZÓN-ROCA Joaquín G. RUIZ-PINILLA José M. ADAM Pedro A. CALDERÓN EKSPERIMENTALNO PROUČAVANJE POJAČAVANJA AB STUBOVA KORIŠĆENJEM ČELIČNOG KAVEZA OPTEREĆENOG AKSIJALNOM SILOM I MOMENTOM SAVIJANJA Originalni naučni rad	3
Špiro GOPČEVIĆ Stanko BRČIĆ Ljiljana ŽUGIĆ SPEKTRALNA MODALNA ANALIZA ZGRADA SA POLUKRUTIM I EKSCENTRIČNIM VEZAMA Pregledni rad	14
Aleksandra MITROVIĆ Dragica JEVTIĆ Ljiljana MILIČIĆ Biljana ILIĆ KARAKTERISTIKE PORTLAND CEMENTA SA DODATKOM METAKAOLINA DOBIJENOG KALCINACIJOM DOMAĆE KAOLINSKE GLINE Originalni naučni rad	32
Ratko MITROVIĆ ENERGETSKA EFIKASNOST I TEHNOLOGIJE PRIMJENE STAKLA U ARHITEKTONSKOM PROJEKTOVANJU Stručni rad	44
Uputstvo autorima	54

CONTENTS

Julio GARZÓN-ROCA Joaquín G. RUIZ-PINILLA José M. ADAM Pedro A. CALDERÓN EXPERIMENTAL STUDY OF RC COLUMNS STRENGTHENED USING STEEL CAGING UNDER AXIAL LOADS AND BENDING MOMENTS Original scientific paper	3
Špiro GOPČEVIĆ Stanko BRCIĆ Ljiljana ZUGIĆ SPECTRAL MODAL ANALYSIS OF BUILDINGS WITH SEMI-RIGID AND ECCENTRIC CONNECTIONS Review paper	14
Aleksandra MITROVIC Dragica JEVTIC Ljiljana MILICIC Biljana ILIC CHARACTERISTICS OF PORTLAND CEMENT WITH ADDITION OF METAKAOLIN OBTAINED BY CALCINATION OF DOMESTIC KAOLIN CLAY Original scientific paper	32
Ratko MITROVIC ENERGY EFFICIENCY AND GLASS TECHNOLOGY USED IN ARCHITECTURAL DESIGNS Professional paper	44
Preview report	54

CIP - Katalogizacija u publikaciji Narodna biblioteka Srbije, Beograd 620.1(497.11)
 ISSN 0543-0798 = Materijali i konstrukcije (Beograd) COBISS.SR-ID 6725890
 Štampa: Štamparija "Hektor Print" - Novi Beograd

EKSPERIMENTALNO PROUČAVANJE POJAČAVANJA AB STUBOVA KORIŠĆENJEM ČELIČNOG KAVEZA OPTEREĆENOG AKSIJALNOM SILOM I MOMENTOM SAVIJANJA

EXPERIMENTAL STUDY OF RC COLUMNS STRENGTHENED USING STEEL CAGING UNDER AXIAL LOADS AND BENDING MOMENTS

Julio GARZÓN-ROCA
Joaquín G. RUIZ-PINILLA
José M. ADAM*
Pedro A. CALDERÓN

ORIGINALNI NAUČNI RAD
UDK: 624.072.2.012.45.046 = 861

1 UVOD

U mnogim slučajevima armiranobetonski (AB) stub zahteva sanaciju ili pojačanje. Razlozi za to mogu da budu u patološkim problemima, kao što su greške u projektovanju ili loše izvođenje; problemi sa trajnošću, kao što je korozija; potreba za prijemom novih opterećenja; ili incidenti, kao što su zemljotresi ili požari.

Jednu od najrasprostranjenijih tehnika saniranja/pojačanja AB stubova predstavlja njihovo pojačanje čeličnim kavezom. Jedan od načina saniranja/pojačanja koji se koristi kod četvorougaoih i pravougaonih stubova, jeste upotreba čeličnih kaveza. Ova tehnika se sastoji od stavljanja čeličnih ugaonika na svaki ugao AB stubova i zavarivanja čeličnih traka za ugaonike. Prostor koji ostaje između kaveza i stuba popunjava se cementom ili epoksi-malterom. Za problem u regionu čvora greda-stub, rešenje može da bude (Ramírez, 1996; Adam i dr. 2009):

- (a) da se ne doda nikakav dodatni element,
- (b) da se na kontaktu sa stubom dodaju kapteli,
- (c) da se za ugaonike zavare cevi koje prolaze kroz čvor greda-stub.

Pokazalo se da čelični kavez predstavlja efikasnu, ekonomičnu i lako primenljivu tehniku jačanja četvorougaoih i pravougaonih stubova (CEB-FIB 2003; Oey i Aldrete, 1996; Wu i dr. 2006). Čelični kavezi su funkcionalni zahvaljujući sledeća tri mehanizmima (Adam i dr. 2008):

Julio Garzón-Roca, Joaquín G. Ruiz-Pinilla,
José M. Adam*, Pedro A. Calderón
Institut za tehnologiju betona i nauku o betonu (ICITECH)
Univerzitet u Valensiji, Španija
*Autor za korespondenciju. E-mail: joadmar@cst.upv.es

1 INTRODUCTION

In many times it is necessary to repair or strengthen a reinforced concrete (RC) column. Reasons may be: pathological problems, like design errors or bad workmanship; durability problems, like corrosion; the need to resist new loads; or accidents, like earthquakes or fires.

Steel jacketing is one of the most common techniques available to repair/strengthening a RC column. One type of steel jacketing, used in square and rectangular columns, is steel caging. This technique consists of placing a steel angle at each corner of the RC column, and steel strips welded to the angles. The space remaining between the cage and the column is filled with cement or epoxy mortar. In order to deal with the beam-column joint region it could be possible (Ramírez 1996; Adam et al. 2009):

- (a) Not placing any additional element
- (b) Adding capitals in contact with the beam
- (c) Welding tubes to the angles, passing through the beam-column joint.

Steel caging has proved to be an effective, economical and easily applied strengthening technique for square or rectangular columns (CEB-FIB 2003; Oey and Aldrete 1996; Wu et al. 2006). Steel caging works thanks to three mechanisms (Adam et al. 2008):

Julio Garzón-Roca, Joaquín G. Ruiz-Pinilla,
José M. Adam*, Pedro A. Calderón
Institute of Concrete Science and Technology (ICITECH)
Universidad Politécnica de Valencia (Spain)
*Corresponding author. E-mail: joadmar@cst.upv.es

- (1) stezi koju kavez predstavlja,
- (2) prenosu napona smicanja, zahvaljujući trenju između kaveza, maltera i betona,
- (3) direktnom prenosu opterećenja kroz čvor greda-stub putem pomoćnih elemenata (u slučaju kada se ne dodaje novi element, ovaj mehanizam ne postoji).

Mada je tehnika upotrebe čeličnog kaveza u mnogim zemljama, kao što su SAD (Oey i Aldrete, 1996), Republika Češka (Cirtek, 2001; Cirtek, 2001b), Japan (Fukuyama i Sugano, 2000), Grčka (Dritsos i Pilakoutas, 1992) ili Španija (Adam i dr. 2009) uobičajena, istraživanja u toj oblasti ipak su oskudna. Osim toga, u većini slučajeva (Ramírez 1996; Adam i dr. 2009; Adam i dr. 2008; Cirtek 2001a; Cirtek 2001b; Adam i dr. 2007; Calderón i dr. 2009; Giménez i dr. 2009a; Giménez i dr. 2009b) istraživanja su usmerena na primenu aksijalnog opterećenja bez ekcentriciteta. Istraživači obično zanemaruju kombinaciju aksijalnog opterećenja i momenta savijanja, a kada se ovakva kombinacija sila ipak razmatra (Montouri i Piluso, 2009), mehanizam kao što je prenos napona smicanja se ne proučavaju.

U ovom radu predstavljeno je istraživanje koje je sprovedeno u Institutu za nauku i tehnologiju betona (ICITECH) sa Politehničkog fakulteta u Valensiji (Španija) i koje je vezano za jačanje AB stubova upotrebom čeličnog kaveza, uz kombinovanje aksijalnog opterećenja i momenta savijanja.

2 EKSPERIMENTALNI PROGRAM

2.1 Testirani uzorci

Testirano je 12 uzoraka u prirodnoj veličini koji simuliraju oblast čvora greda-stub jednog tipičnog građevinskog skeleta. Uzorci su se sastojali od dve dužine AB stubova sa poprečnim centralnim elementom koji predstavlja gredu (Adam i dr. 2008; Watson i Park, 1994; Wu i dr. 2003; Li i dr. 2009). Na slici 1 prikazana je geometrija uzoraka i armatura.

Poprečni presek stuba iznosio je 260x260 mm, što je nešto više od minimalnog preseka kojeg većina međunarodnih propisa dozvoljava (CEN 2004; CEB-FIB 1991). Uzdužna armatura se sastojala od četiri čelične šipke prečnika 12 mm, a poprečna armatura je bila čisto konstruktivna; uzengije su skoncentrisane na krajevima stubova da bi se izbeglo moguće lokalno otkazivanje zbog nanetog opterećenja. Geometrija i armatura grede bila je slična onoj koja se obično koristi u skeletima stambenih zgrada.

Kod svakog uzorka, na krajeve stubova postavljene su čelične kutije kako bi se apsorbiralo aksijalno opterećenje koje vrši hidraulična test-mašina i kako bi delovale kao veza između uzorka i testiranog skeleta. Uzdužne armaturne šipke stuba zavarene su za ove elemente.

Pojačanje je vršeno samo duž stuba, dok je pojačanje na čvoru greda-stub prekinuto. Pojačanje (vidi sliku 2) je projektovano na osnovu drugih testova (Adam i dr. 2009; Adam i dr. 2008; Adam i dr. 2007; Giménez i dr. 2009b) nastojeći da se izbegne prerani lom zbog sila smicanja. Proces pojačanja se sastojao od glačanja četiri čoška stuba, stavljanja sloja cementnog maltera između betona i čeličnog kaveza, instaliranja ugaonika i

- (1) Confinement imposed the cage
- (2) Shear stress transmission, due to friction between cage, mortar and concrete
- (3) Direct transmission of loads through the beam-column joint by means of auxiliary elements (in case of not placing any element, this mechanism will not exist).

Although steel caging is a common technique in several countries like USA (Oey and Aldrete 1996), Czech Republic (Cirtek 2001a; Cirtek 2001b), Japan (Fukuyama and Sugano 2000), Greece (Dritsos and Pilakoutas 1992) or Spain (Adam et al. 2009), research on the topic is scarce. In addition, in most cases (Ramírez 1996; Adam et al. 2009; Adam et al. 2008; Cirtek 2001a; Cirtek 2001b; Adam et al. 2007; Calderón et al. 2009; Giménez et al. 2009a; Giménez et al. 2009b) the studies are focused on the application of an axial load without eccentricity. The combination of an axial load and a bending moment has been usually neglected by the researchers and when this combination of forces has been taking into account (Montouri and Piluso 2009), mechanisms like shear stress transmission were not studied.

This paper shows the study carried out at the Institute of Concrete Science and Technology (ICITECH) from the Universidad Politécnica de Valencia (Spain) related to the strengthening of RC columns with steel caging, under a combination of an axial load and a bending moment.

2 EXPERIMENTAL PROGRAM

2.1 Test specimens

12 full-scaled specimens simulating the beam-column joint region of a typical building frame were tested. Specimens consisted of two lengths of RC column with a crossing central element representing a beam (Adam et al. 2008; Watson and Park 1994; Wu et al. 2003; Li et al. 2009). Fig. 1 shows specimens geometry and reinforcement.

The column had a cross section of 260x260 mm, slightly greater than the minimum allowed by most international codes (CEN 2004; CEB-FIB 1991). Its longitudinal reinforcement consisted of 4 steel bars of 12 mm of diameter and the transversal reinforcement was merely constructive; stirrups were concentrated at the end of the columns, to avoid a possible local failure due to load application. Beam geometry and reinforcement were similar to the normally used in residential-building frames.

In each specimen, steel boxes were arranged at the end of the two lengths of columns to absorb the axial load applied by the hydraulic testing machine, and to act as the connection between the specimen and the test frame. The reinforcing longitudinal bars of the column were welded to these elements.

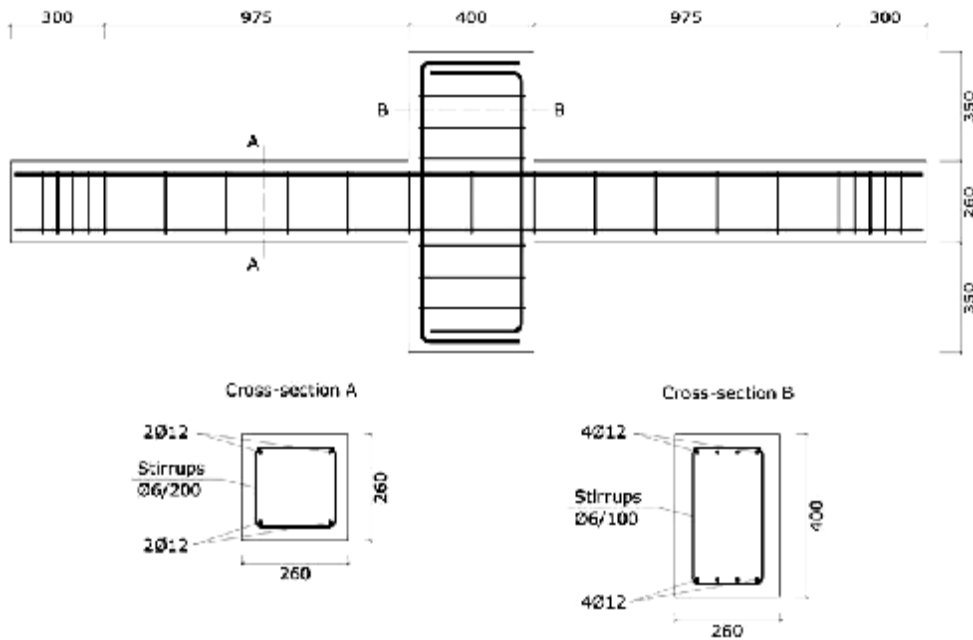
Only the lengths of column were strengthened, leaving interrupted the strengthening at the beam-column joint. The strengthening (see Fig. 2) was designed following other tests (Adam et al. 2009; Adam et al. 2008; Adam et al. 2007; Giménez et al. 2009b) trying to avoid a premature failure due to shear forces. The strengthening procedure included: smoothing the four corners of

traka, te zavarivanja elemenata čeličnog kaveza.

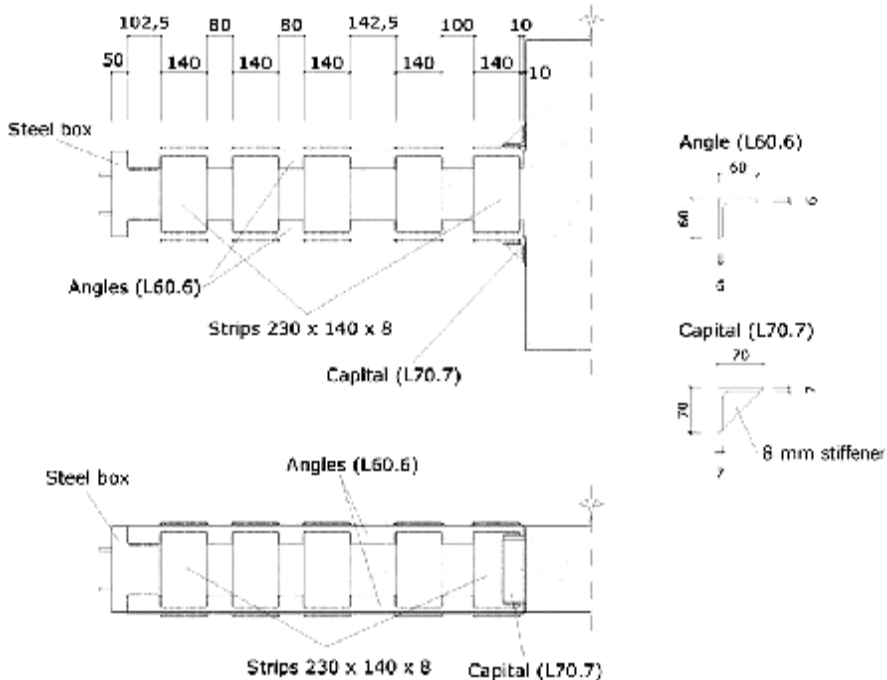
Ugaonici čeličnog kaveza su zavareni za čelične kutije kako bi se između kaveza i okvira testiranja osigurao dobar prenos sila. Osim toga, za kraj čeličnog kaveza, u dodirnu tačku sa gredom, zavareni su kapiteli (takođe sa čeličnim ugaonicima) (Adam i dr. 2009; Adam i dr. 2008; Adam i dr. 2007; Ramirez i dr. 1997).

the column; placing a cement mortar layer between the concrete and the steel cage; installing the angles and strips; and finally, welding the steel caging elements.

Angles of the steel caging were welded to the steel boxes to assure a good transmission of forces between the cage and the testing frame. Additionally, capitals (made with steel angles too) were welded at the end of the steel caging, in contact with the beam (Adam et al. 2009; Adam et al. 2008; Adam et al. 2007; Ramirez et al. 1997).

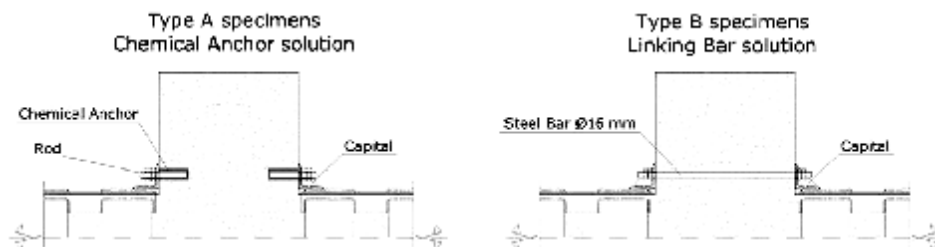


Slika 1. Geometrija i pojačanje testiranih uzoraka (dimenzije su date u milimetrima)
 Fig. 1. Geometry and reinforcement of the tested specimens (dimensions in mm)



Slika 2. Elementi pojačanja uzoraka (dimenzije su date u milimetrima)
 Fig. 2. Specimen strengthening elements (dimensions in mm)

Pojačanje je bilo istovetno kod svakog uzorka. Da bi se poboljšao direktan prenos, testirana su dva tipa rešenja za čvor greda-stub: kod uzorka tipa A, kapiteli su pričvršćeni za gredu pomoću hemijskih anкера; kod uzorka tipa B, kapiteli sa obe strane grede povezani su pomoću čelične šipke prečnika 16 mm (vezivna šipka). Na slici 3 prikazana su dva tipa testiranih uzoraka.



Slika 3. Testiranje rešenja čvora greda-stub
Fig. 3. Beam-column joint solution tested

2.2 Materijali

Betonska mešavina (vidi Tabelu 1) koja je korišćena projektovana je tako da simulira stub sa niskom otpornošću na pritisak koji zahteva pojačanje (Adam i dr. 2008; Adam i dr. 2007; Calderon i dr. 2006; Gimenez i dr. 2006). Otpornost betona na pritisak prilikom testiranja uzorka iznosila je između 10 i 12 MPa.

Tabela 1. Odnos elemenata bešavine betona
(kg na m³ betona)

Cement	Voda	Fini agregat	Grubi agregat
150	200	1225	810

Napon popuštanja armaturnog čelika, kako u uzdužnim šipkama, tako i u uzengijama, iznosio je 500 MPa. Vezivne šipke u čvoru greda-stub napravljene su od istog materijala. Čelični kavez je napravljen od čelika čiji napon popuštanja iznosi 275 MPa. Odnos cementa i peska u cementnom malteru kojim je popunjen prostor između kaveza i betona iznosio je 1:2.

2.3 Tok testiranja

Uzorci koji su testirani prikazani su u Tabeli 2. Uzorci su testirani horizontalno (Adam i dr. 2009; Adam i dr. 2008; Gimenez i dr. 2009b) u čeličnom skeletu, primenjujući prvo aksijalno opterećenje. Zatim, uz održavanje aksijalnog opterećenja na konstantnom nivou, primenjen je momenat savijanja zbog čega je došlo do vertikalnog pomeranja vrha grede. Ovo pomeranje je primenjivano sve do lomljenja uzorka. Na slici 4 prikazan je uzorak u laboratoriji, spreman za testiranje.

Nivoi aksijalnog opterećenja iznosili su: 400 (L1), 800 (L2) i 1200 (L3) kN. Ovi nivoi su iznosili oko 25%, 50%, odnosno 75% od konačnog opterećenja pojačanog stuba

The strengthening was the same for all specimens. In order to improve the direct transmission, two types of beam-column joint solution were tested: in Specimens type A, capitals were joined to the beam using chemical anchors; in Specimens type B the capitals at the two sides of the beam were linked with a steel bar of 16 mm of diameter (linking bar). Fig. 3 show the two types of specimens tested.

2.2 Materials

The concrete mix (see Table 1) used was designed to simulate a column with low compressive strength which need strengthening (Adam et al. 2008; Adam et al. 2007; Calderón et al. 2006; Giménez et al. 2006). Concrete achieved a compressive strength between 10 and 12 MPa when the specimen were tested.

Table 1. Mix concrete proportions
(kg per m³ of concrete)

Cement	Water	Fine aggregate	Coarse aggregate
150	200	1225	810

The yield stress of the reinforcement steel, both longitudinal bars and stirrups, was 500 MPa. The linking bars placed in the beam-column joint were made with the same material. The steel caging was made with steel of 275 MPa of yield stress. The cement mortar placed between the cage and the concrete had a cement/sand ratio of 1:2.

2.3 Test setup

The different specimens tested are shown in Table 2. Specimens were tested horizontally (Adam et al. 2009; Adam et al. 2008; Adam et al. 2007; Giménez et al. 2009b) in a steel frame, applying firstly the axial load. Then, and remaining the axial load constant, a bending moment was created imposing a vertical displacement on the top of the beam. This displacement was applied until the failure of the specimen. Fig. 4 shows a specimen in the laboratory ready to be tested.

Three axial load levels were defined: 400 (L1), 800 (L2) and 1200 (L3) kN. These load levels were about 25%, 50% and 75% of the ultimate axial load of the strengthened column (Adam et al. 2009). For each axial

(Adama i dr. 2009). Za svaki nivo aksijalnog opterećenja, testirana su bar dva uzorka. Aksijalno opterećenje je primenivano pomoću hidraulične test-mašine maksimalnog kapaciteta 2500 kN. Vertikalno (smičuće) opterećenje primenivano je pomoću hidraulične test-mašine kapaciteta 500 kN.

load, at least two specimens were tested. The axial load was applied by a hydraulic testing machine with a maximum capacity of 2500 kN. The vertical (shear) load was applied by a hydraulic testing machine with a maximum capacity of 500 kN.

Tabela 2. Testirani uzorci
Table 2. Specimens tested

Uzorak Specimen	f_c^*	Aksijalno opterećenje Axial load (kN)	Smičuće opterećenje Shear load (kN)	Moment savijanja ^{**} Bending moment ^{**} (m · kN)
A-L1-1	9.80	400	106,67	77,60
A-L1-2	12.65	400	112,49	81,84
A-L2-1	12.43	800	136,99	99,66
A-L2-2	9.80	800	99,32	72,26
A-L3-1	9.80	1200	68,48	49,82
A-L3-2	12.43	1200	99,74	72,56
B-L1-1 [†]	12.43	400	141,14	102,68
B-L1-2	10.68	400	134,09	97,55
B-L1-3	10.68	400	135,71	98,73
B-L2-1	12.43	800	146,18	106,35
B-L2-2	10.68	800	120,35	87,55
B-L3-1 [‡]	10.68	1200	-	-

* Otpornost na pritisak na dan testiranja.

* Compressive strength at testing days.

** Moment savijanja na dodirnoj tački stuba i čvora greda-stub.

** Bending moment in the confluence of the column with the beam-column joint.

† Otkaz ojačivača kapitela.

† Capital stiffener failed.

‡ Uvijanje se javilo pre primene smičućeg opterećenja.

‡ Buckling occurred before applying the shear load.



Slika 4. Uzorak u laboratoriji, spreman za testiranje
Fig. 4. A specimen in the laboratory ready to be test

3 REZULTATI I DISKUSIJA

Eksperimentalni rezultati za svaki uzorak prikazani su u Tabeli 2. U ovoj tabeli, za svaki uzorak nabrojana su aksijalna opterećenja koja su primenjena, maksimalno ostvareno opterećenje smicanja i momenat savijanja koji je generisan opterećenjem smicanja pri lomu u poslednjem odeljku stuba (u dodirnoj tački stuba sa čvorom greda-stub). Kod svih uzoraka do loma je dolazilo na čvoru greda-stub. Osim toga, pre primene smičućeg opterećenja, ni u jednom slučaju nisu opažene pukotine.

Tokom testiranja uzorka B-L1-1, došlo je do otkazivanja varova na ojačivačima kapitela. Zbog toga ovaj uzorak nije mogao da podnese toliko smičuće opterećenje koliko bi trebalo da podnese. Osim toga, kod uzorka B-L3-1 došlo je do izvijanja odmah po primeni aksijalnog opterećenja, a pre primene smičućeg opterećenja. Sledstveno tome, u analizi rezultata ova dva uzorka nisu uzeta u obzir.

Razlike u krajnjem opterećenju za isti stepen aksijalnog opterećenja i rešenja za čvor greda-stub (na primer, razlika između uzorka A-L1-1 i A-L1-2) mogu se objasniti, između ostalog, i razlikom u otpornosti betona na pritisak, f_c (u Tabeli 2 prikazana je otpornost betona na pritisak koja je ostvarena na dan testiranja, oko dva meseca po betoniranju uzoraka).

Iz rezultata u Tabeli 2 moguće je nacrtati eksperimentalni dijagram aksijalnog opterećenja/savijanja (N-M) za betonski stub ojačan čeličnim kavezom. Taj dijagram je prikazan na slici 5. Nacrtan je i teoretski N-M dijagram za onaj deo AB stuba koji nije ojačan (za otpornost betona na pritisak od 12 MPa). Vidi se da se korišćenjem čeličnog kaveza sa hemijskim ankerima ili vezivnim šipkama kao čvorovima greda-stub, otpornost elementa u znatnoj meri povećava.

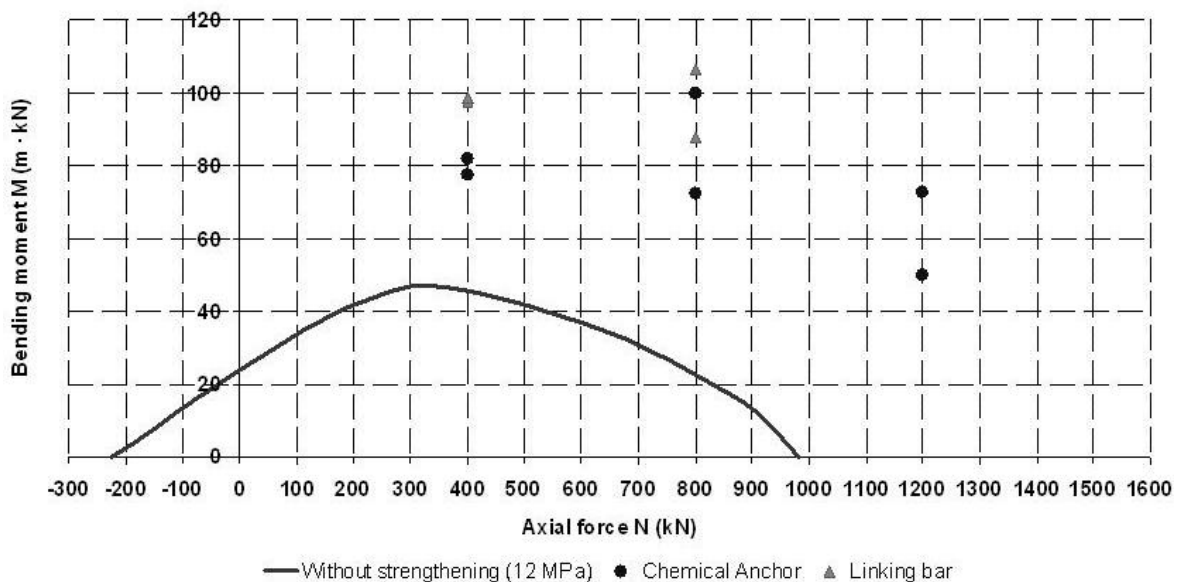
3 RESULTS AND DISCUSSION

The experimental results of each specimen are summarized in Table 2. This table lists, for each specimen, the axial load applied, the maximum shear load achieved and the bending moment generated by the shear load at failure in the last section of the column (in the confluence of the column with the beam-column joint). In all specimens the failure occurred at the beam-column joint. In addition in no case was observed cracking before applying the shear load.

During the test of specimen B-L1-1, welding of the capital stiffeners failed. As a result, this specimen could not achieve as much shear load as it could be. In addition, specimen B-L3-1 buckled before applying the shear load, just after the axial load was applied. Consequently, these two specimens are not considered in the analysis of the results.

Differences in the ultimate load for the same axial load level and type of beam-column joint solution (for example, difference between specimens A-L1-1 and A-L1-2) can be explained, among others, by the difference in the concrete compressive strength, f_c (Table 2 shows concrete compressive strength reached at the testing days, about two months after the specimens cast).

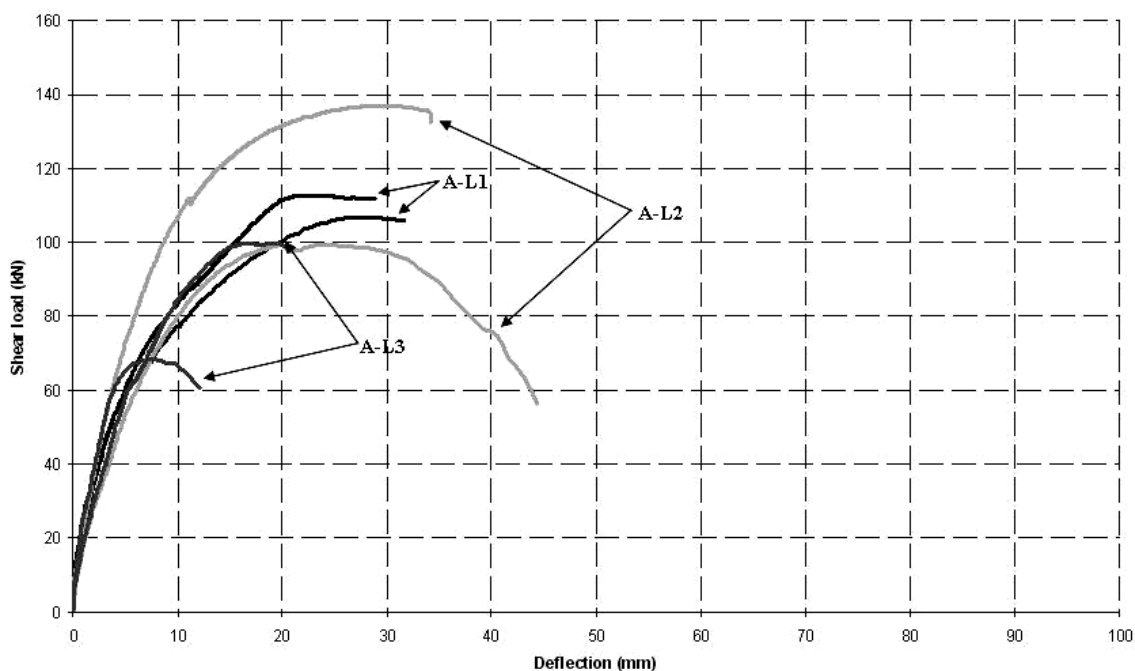
From the results of Table 2 it is possible to draw an experimental axial-bending (N-M) diagram for a concrete column strengthened with steel caging. This diagram is shown in Fig. 5. The theoretical N-M diagram for a RC column section without strengthening is also plot (for a compressive concrete strength of 12 MPa). It can be seen that the use of steel caging with the solutions of chemical anchors or linking bars for the beam-column joint, increase significantly the resistance of the element.



Slika 5. N-M dijagram za stub sa deonicom sa i bez ojačanja
Fig. 5. N-M diagram for the column section with and without strengthening

Na slikama 6 i 7 pokazane su krive zavisnosti smičuća sila u gibu za uzorak A i B, respektivno. U svim slučajevima, pre otkazivanja uzorka dolazilo je do velikih deformacija, što ukazuje na visok stepen duktilnost ovih elemenata. Kod uzoraka tipa A, maksimalno smičuće opterećenje i veća duktilnost ostvorena je kod aksijalnog opterećenja od 800 kN (aksijalni nivo L2). Kod uzoraka tipa B, dok je maksimalno vertikalno opterećenje takođe postignuto pri aksijalnom opterećenju od 800 kN, duktilnost je ipak veća kod uzoraka B-L1 (aksijalno opterećenje od 400 kN). Sa druge strane, za isti nivo aksijalnog opterećenja, kod uzoraka tipa B ostvorena je veća duktilnost nego kod uzoraka tipa A.

Figs. 6 and 7 show the shear load – deflection curves for specimens A and B respectively. In all cases a great deformation is achieved before the failure of the specimen, which denotes the high ductility of these elements. For type A specimens, both the maximum shear load and the greater ductility is reached for an axial load of 800 kN (Axial level L2). Nevertheless, in type B specimens, while the maximum vertical load is also reached for an axial load of 800 kN, the ductility is greater for B-L1 specimens (400 kN of axial load). On the other hand, for the same axial level, type B specimens achieved more ductility than type A specimens.



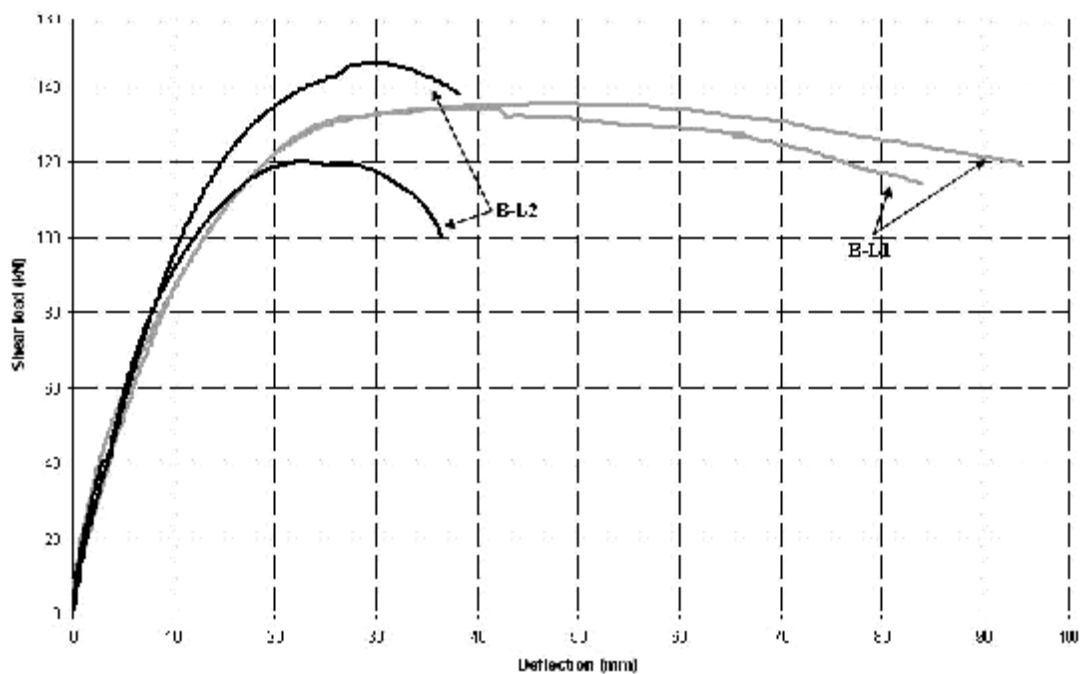
Slika 6. Kriva ugiba od smičućeg opterećenja za uzorke tipa A
Fig. 6. Shear load-deflection curves for type A specimens

Razlike između dva tipa testiranih uzoraka mogu se primetiti i prilikom testiranja u oblasti zatezanja (ispod osovine stuba). Kao što je prikazano na slici 8, kod uzoraka tipa A, zbog postojanja hemijskog ankera, u betonu se formirala jedna prslina u obliku konusa. Za razliku od ovoga, kod uzoraka tipa B, pukotina se pojavila blizu dodirne tačke stuba i grede. U slučaju uzoraka B-L1, ova pukotina je bila prilično velika.

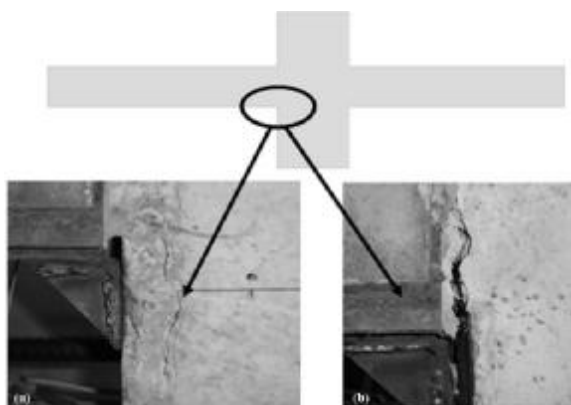
Na kraju testa moglo se zaključiti da su u svim slučajevima kapiteli u regionu pritiska (iznad osovine stuba) prodrli u čvor greda-stub, kako je to prikazano na slici 9. Međutim, u oblasti zatezanja, kapiteli su se odvojili od čvora greda-stub (slika 10). Ova pojava je primetnija kod uzoraka B-L1.

Differences between the two types of specimens tested could be also observed along the tests in the tension region (below the axis of the column). As it is shown in Fig. 8, in type A, due to the existence of the chemical anchor, it was formed a breakout cone in the concrete. In contrast, in type B specimens, a crack appeared near the confluence of the column and the beam; this crack was significantly great in case of B-L1 specimens.

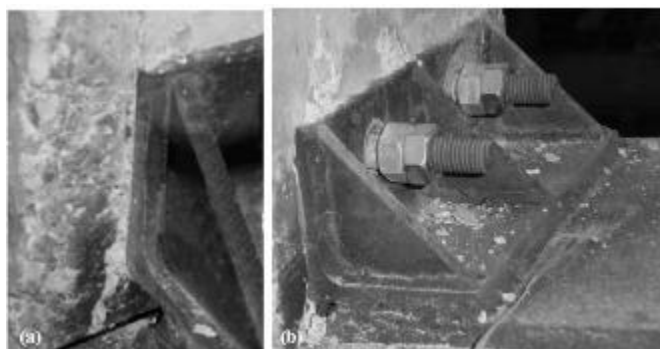
At the end of the test it could be observed that in all cases, capitals in compression region (above the axis of the column) penetrated into the beam-column joint, as it is shown in Fig. 9. However, in the tension region, capitals (Fig. 10) suffered a separation with the beam-column joint. This phenomenon was more noticeable in B-L1 specimens.



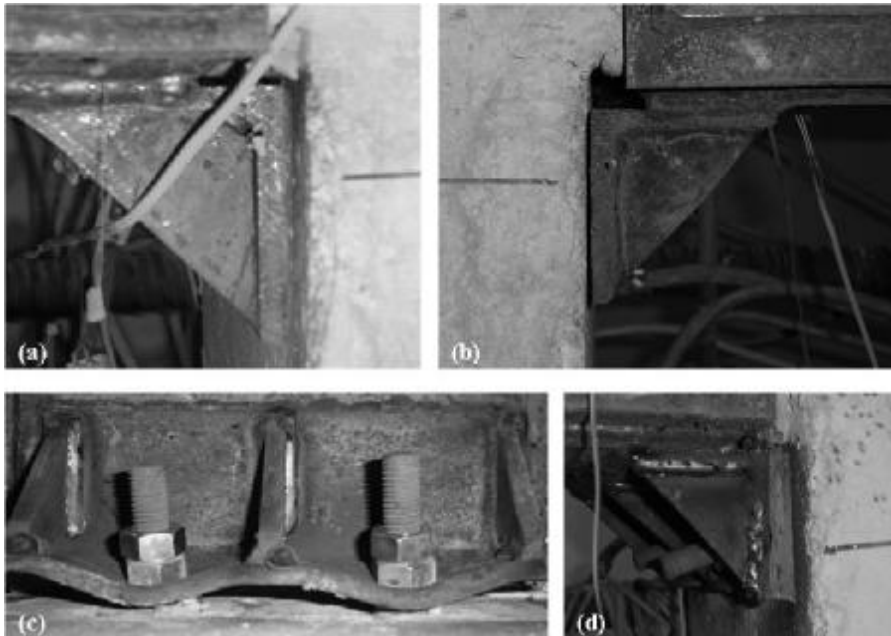
Slika 7. Kriva ugiba od smičućeg opterećenja za uzorke tipa B
 Fig. 7. Shear load-deflection curves for type B specimens



Slika 8. Pojava koja se javila u oblasti zatezanja; (a) konus prsline (uzorci tipa A); (b) prilično velike pukotine (uzorci tipa B)
 Fig. 8. Phenomenon appeared in tension region; (a) Breakout cone (type A specimens); (b) Cracks of significantly dimension (type B specimens)



Slika 9. Prodiranje kapitela pod pritiskom; (a) uzorak A-L3; (b) uzorak B-L1.
 Fig. 9. Penetration observed in capitals in compression; (a) A-L3 specimen; (b) B-L1 specimen



Slika 10. Odvajanje kapitela u oblasti zatezanja; (a) uzorci A-L1; (b) uzorci A-L2; (c) i (d) dva pogleda na kapitela u poslednjoj fazi kod uzoraka B-L1

Fig. 10. Separation suffered by capitals in tension zone; (a) A-L1 specimens; (b) A-L2 specimens; (c) and (d) Two sights of the capitals in the final stage in B-L1 specimens

4 ZAKLJUČAK

U ovom radu predstavljeni su rezultati dobijeni pojačanjem AB stuba čeličnim kavezom, uz istovremenu primenu aksijalnog opterećenja i momenta savijanja. Na kraj stuba, na dodirnu tačku sa gredom, montirani su kapiteli, a da bi se osigurao dobar prenos opterećenja u čvoru greda-stub, primenjene su dve tehnike: hemijski ankeri i vezivne šipke (čelična šipka koja povezuje kapitela sa obe strane grede).

Iz rezultata eksperimentalnog proučavanja može se zaključiti da se primenom čeličnog kaveza, uz hemijski anker i vezivne šipke, poboljšava kako otpornost, tako i duktilnost AB stuba. Kada se uporedi primena hemijskog ankera i vezivnih šipki, zabeleženo je da kod elemenata opterećenih istim aksijalnim opterećenjem, vezivne šipke ostvaruju veću duktilnost i veći krajnji momenat savijanja nego hemijski ankeri.

ZAHVALNOST

Autori izražavaju zahvalnost Španskom Ministarstvu nauke i inovacija zbog finansijske podrške istraživačkom projektu BIA 2008-06268.

4 CONCLUSION

This paper has shown the good results obtained strengthening a RC column with steel caging, when an axial load and a bending moment are both present at the same time. Capitals have been placed at the end of the column, in contact with the beam, and, in order of assuring a good transmission of loads in the beam-column joint, two techniques have been used: chemical anchors and linking bars (a steel bar linking capitals at each side of the beam).

From the results of the experimental study, it can be concluded that steel caging with chemical anchor and linking bars improves both the resistance and the ductility of the RC column. When it is compared the use of chemical anchor and linking bars, it is observed that for an element loaded at the same axial load, linking bars achieve more ductility and more ultimate bending moment than chemical anchors.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to express their gratitude for the financial support received from the Spanish Ministry of Science and Innovation under the research project BIA 2008-06268.

5 REFERENCES

- [1] Adam, J. M., Giménez, E., Calderón, P. A., Pallarés, F. J., and Ivorra, S. (2008). "Experimental study of beam-column joints axially loaded RC columns strengthened by steel angles and strips." *Steel and Composite Structures*, 8(4), 329-342.
- [2] Adam, J. M., Ivorra, S., Moragues, J. J., Miragall, C., and Calderón, P. A. (2007). "Behaviour of axially loaded RC columns strengthened by steel angles and strips." *Steel and Composite Structures*, 7(5), 405-419.
- [3] Adam, J. M., Ivorra, S., Pallarés, F. J., Giménez, E., and Calderón, P. A. (2009). "Axially loaded RC columns strengthened by steel caging. Finite element modelling." *Constr.Build.Mater.*, 23(6), 2265-2276.
- [4] Calderón, P. A., Adam, J. M., Ivorra, S., Pallarés, F. J., and Giménez, E. (2009). "Design strength of axially loaded RC columns strengthened by steel caging." *Mater Des*, 30(10), 4069-4080.
- [5] Calderón, P. A., Giménez, E., Adam, J. M., and Ivorra, S. (2006). "Full scaled testing of RC columns strengthened with steel angles and battens." *Structural Faults and Repair-2006, Edinburgh*, .
- [6] CEB-FIB. (2003). Seismic assessment and retrofit of reinforced concrete buildings. Bulletin no. 24 FIB, Lausanne, Switzerland.
- [7] CEB-FIB. (1991). *Model Code 90*. Bulletin no. 213/214 CEB, Lausanne, Switzerland.
- [8] CEN. (2004). *EN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of Concrete Structures, Part 1: General Rules and Rules for Buildings*. Brussels, Belgium.
- [9] Cirték, L. (2001a). "Mathematical model of RC banded column behaviour." *Constr.Build.Mater.*, 15(8), 351-359.
- [10] Cirték, L. (2001b). "RC columns strengthened with bandage — experimental programme and design recommendations." *Constr.Build.Mater.*, 15(8), 341-349.
- [11] Dritsos, S., and Pilakoutas, K. (1992). "Composite technique for repair/strengthening of RC members." *Proc. of 2nd International Symposium on Composite Materials and Structures, Beijing, China*, .
- [12] Fukuyama, H., and Sugano, S. (2000). "Japanese seismic rehabilitation of concrete buildings after the Hyogoken-Nanbu Earthquake." *Cement and Concrete Composites*, 22(1), 59-79.
- [13] Giménez, E., Adam, J. M., Calderón, P. A., and Ivorra, S. (2006). "Numerical and experimental study of the strengthening of reinforced concrete columns using steel angles and strips." *Proceedings of the Tenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction (EASEC-10), Bangkok*, .
- [14] Giménez, E., Adam, J. M., Ivorra, S., and Calderón, P. A. (2009a). "Influence of strips configuration on the behaviour of axially loaded RC columns strengthened by steel angles and strips." *Mater Des*, 30(10), 4103-4111.
- [15] Giménez, E., Ivorra, S., Moragues, J. J., and Calderón, P. A. (2009b). "Full-scale testing of axially loaded RC columns strengthened by steel angles and strips." *Advance Structural Engineering*, 12(2), 169-181.
- [16] Li, J., Gong, J., and Wang, L. (2009). "Seismic behavior of corrosion-damaged reinforced concrete columns strengthened using combined carbon fiber-reinforced polymer and steel jacket." *Constr.Build.Mater.*, 23(7), 2653-2663.
- [17] Montuori, R., and Piluso, V. (2009). "Reinforced concrete columns strengthened with angles and battens subjected to eccentric load." *Eng.Struct.*, 31(2), 539-550.
- [18] Oey, H. S., and Aldrete, C. J. (1996). "Simple Method for Upgrading an Existing Reinforced-Concrete Structure." *Pract.Periodical on Struct.Des.and Constr.*, 1(1), 47-50.
- [19] Ramírez, J. L., Bárcena, J. M., Urreta, J. I., and Sanchez, J. A. (1997). "Efficiency of short steel jackets for strengthening square section concrete columns." *Constr.Build.Mater.*, 11(5-6), 345-352.
- [20] Ramírez, J. (1996). "Ten concrete column repair methods." *Constr.Build.Mater.*, 10(3), 195-202.
- [21] Watson, S., and Park, R. (1994). "Simulated Seismic Load Tests on Reinforced Concrete Columns." *J.Struct.Engrg.*, 120(6), 1825-1849.
- [22] Wu, Y. F., Griffith, M. C., and Oehlers, D. J. (2003). "Improving the Strength and Ductility of Rectangular Reinforced Concrete Columns through Composite Partial Interaction: Tests." *J.Struct.Engrg.*, 129(9), 1183-1190.
- [23] Wu, Y. F., Liu, T., and Oehlers, D. J. (2006). "Fundamental principles that govern retrofitting of reinforced concrete columns by steel and FRP jacketing." *Advance Structural Engineering*, 9(4), 507-533.

REZIME

EKSPERIMENTALNO PROUČAVANJE POJAČAVANJA AB STUBOVA KORIŠĆENJEM ČELIČNOG KAVEZA OPTEREĆENOG AKSIJALNOM SILOM I MOMENTOM SAVIJANJA

Julio GARZÓN-ROCA
Joaquín G. RUIZ-PINILLA
José M. ADAM
Pedro A. CALDERÓN

Oštećena konstrukcija, problem trajnosti i incidenti ili potreba prijema povećanih opterećenja, uslovljavaju sanacije ili pojačavanja armiranobetonskih (AB) stubova. Jedna od najčešće primenjenih tehnika, široko korišćenih u svetu za sanacije AB stubova je dodavanje čeličnog kaveza. Uprkos čestom korišćenju, istraživanja u ovoj oblasti su oskudna, a odnose se na primenu samo kod aksijalnog opterećenja.

Serijski uzorci, u prirodnoj veličini, koji simuliraju čvorove greda-stub ispitivani su pod kombinovanim opterećenjem aksijalnom silom i momentom savijanja. Uzorci su opterećivani sa tri stepena aksijalne sile (400, 800 i 1200 kN) i savijanjem do loma. U svim slučajevima korišćeni su kapiteli (od ugaonika) na spoju grede i stuba. Prenos opterećenja u čvor greda-stub je obezbeđen korišćenjem kapitela sa dva različita rešenja. U radu je pokazano da se upotrebom čeličnih kaveza povećava i duktilnost i maksimalna nosivost AB stubova.

Ključne reči: AB stub, čelina obujmica, čelični kavez (skelt), čvor greda-stub

SUMMARY

EXPERIMENTAL STUDY OF RC COLUMNS STRENGTHENED USING STEEL CAGING UNDER AXIAL LOADS AND BENDING MOMENTS

Julio GARZÓN-ROCA
Joaquín G. RUIZ-PINILLA
José M. ADAM
Pedro A. CALDERÓN

Pathologies, durability problems, accidents or the need to resist new loads, may lead to the repair or strengthening of a reinforced concrete column. One of the most common techniques widely used through the world to repair/strengthening a reinforced concrete column is steel caging. Despite it is highly used, research in the area is scarce, and normally related to the application of a pure axial load.

A series of full-scale specimens simulating the beam-column joint were tested under a combination of axial load and bending moment. Specimens were subjected to three axial load levels (400, 800 and 1200 kN) and loaded under bending until failure. In all cases, capitals were placed at the end of the column, in contact with the beam. The transmission of load in the beam-column joint was assured using capitals with two different solutions. This paper shows that the use of steel caging increases both the ductility and the maximum load of the reinforced concrete columns.

Key words: RC Columns, Strengthening, Steel jacket, Steel caging, Beam-column joint

SPEKTRALNA MODALNA ANALIZA ZGRADA SA POLUKRUTIM I EKSCENTRIČNIM VEZAMA

SPECTRAL MODAL ANALYSIS OF BUILDINGS WITH SEMI-RIGID AND ECCENTRIC CONNECTIONS

Špiro GOPČEVIĆ
Stanko BRČIĆ
Ljiljana ŽUGIĆ

PREGLEDNI RAD
UDK: 69.057:517.962 = 861

1 UVOD

Skeletne zgrade predstavljaju najčešće primenjivane konstrukcije u zgradarstvu. Jedan deo skeletnih zgrada su zgrade sa čeličnom konstrukcijom. Veza greda-stub kod zgrada je medijum koji prenosi odgovarajuće sile i momente sa elementa na element. Prilikom idealizacije veza u čvorovima, polazi se od pretpostavke da su veze idealne: krute ili zglobne. Veliki broj ispitivanja realnih veza pokazao je da većina krutih veza nije apsolutno kruta, kao i da većina zglobnih veza nije idealna. Krute veze pri opterećenju dozvoljavaju izvesnu relativnu rotaciju na mestu veze, dok zglobne veze pri opterećenju pokazuju određen stepen rotacione krutosti. Veze koje po svome ponašanju predstavljaju prelaz između zglobnih i krutih veza nazivaju se polukrute veze. Kao što su čelične veze više ili manje fleksibilne, tako su one takođe više ili manje ekscentrične. Najčešće se ekscentricitet veze zanemaruje, međutim u nekim slučajevima to nema opravdanja. To je slučaj kada su veze ostvarene preko čvornog lima, tako da odnos ekscentriciteta i dužine linijskog elementa nije mali. Kod rešetkastih nosača odnos ekscentriciteta i dužine štapa može da iznosi i do 20%, dok je kod ramovskih sistema on značajno manji i iznosi oko 5%. Zbog velikog značaja polukrutih i ekscentričnih veza na konačne rezultate proračuna, poslednjih godina definisanje ponašanja veze je predmet mnogobrojnih naučnih radova [2,5,6,7].

Dr Špiro Gopčević, dipl.inž.građ.
JP Železnice Srbije, Nemanjina 6, 11000 Beograd, Srbija;
e-mail: spiro.gopcevic@srbrail.rs
Prof. dr Stanko Brčić, dipl.inž.građ.
Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd; e-mail:
stanko@grf.bg.ac.rs
Dr. Ljiljana Žugić, dipl.inž.građ.
Univerzitet Crne Gore, Građevinski fakultet, Cetinjski put bb, 81000 Podgorica, Crna Gora; e-mail: ljilja@ac.me

1 INTRODUCTION

Framework buildings represent one of the very frequent structural systems of buildings. Among framed buildings, steel structures are an important part. Connection beam-to-column is the medium to transfer the corresponding forces and moments from element to element. Numerical idealization of joint connections usually assumes an ideal connection: either rigid or pinned. A large number of investigations of the real connections show that the majority of rigid connections are not absolutely rigid, and also that the majority of pinned connections are not ideally hinged. Rigid connections, when loaded, allow some relative rotation at a joint, while pinned connections exhibit some rotational stiffness under loads. The connections that in their behavior under loads represent an intermission between the ideally pinned and rigid connections are called semi-rigid or flexible connections. In the same way as the connections in steel frames are more or less flexible, they are also, more or less, eccentric. Usually, the joint eccentricity is disregarded; however, in some cases it is not justified. It is the case of joints with nodal plates, when the ratio between eccentricity and element length is not small. In steel trusses the ratio of eccentricity and the bar length may be up to 20%, while in framed systems that ratio is substantially smaller and is about 5%. Due to substantial effect of semi-rigid conec-

Dr Špiro Gopčević, dipl.inž.građ.
JP Železnice Srbije, Nemanjina 6, 11000 Beograd, Srbija;
e-mail: spiro.gopcevic@srbrail.rs
Prof. dr Stanko Brčić, dipl.inž.građ.
Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd; e-mail:
stanko@grf.bg.ac.rs
Dr. Ljiljana Žugić, dipl.inž.građ.
Univerzitet Crne Gore, Građevinski fakultet, Cetinjski put bb, 81000 Podgorica, Crna Gora; e-mail: ljilja@ac.me

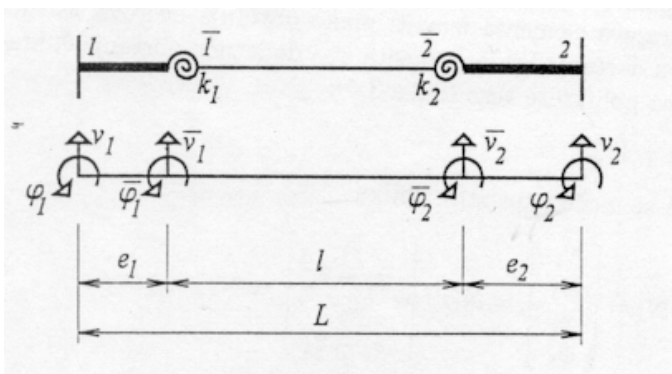
U odnosu na proračun u statičkoj analizi, dinamički proračun zgrada je ne samo obimniji, već i znatno komplikovaniji. Razlog za to je veći broj potrebnih parametara, uključujući i vremensku dimenziju, kao i, inženjerski gledano, mnogo neizvesnija procena ulaznih veličina. Dinamičko opterećenje zgrade može da bude dato kao: opterećenje nekom proizvoljnom dinamičkom silom, seizmičkim opterećenjem datim preko dinamičkog pomeranja oslonaca ili seizmičkim opterećenjem datim preko krive spektra pseudoubrzanja. Pri opterećenju zgrade spektrom pseudoubrzanja, u definisanom pravcu, dobijaju se približne vrednosti maksimalnog odgovora jer kombinacija modalnih odgovora uzima u obzir samo maksimalne vrednosti odgovora za pojedine oblike ne vezujući se za vremenski trenutak u kojem su maksimalne vrednosti nastale. Međutim, za svaki uticaj može da se odredi pravac spektra pseudoubrzanja za koji posmatrani uticaj ima ekstremnu vrednost i da se tada nađu ekstremne vrednosti uticaja usled datog spektra pseudoubrzanja [8].

Zgrade su kontinualni trodimenzionalni sistemi sa kompleksnom raspodelom krutosti, mase i opterećenja. Pri njihovom matematičkom modeliranju obično se usvaja linearno elastično ponašanje koje dozvoljava princip superpozicije.

2 MATEMATIČKI MODEL ŠTAPA SA POLUKRUTIM I EKSCENTRIČNIM VEZAMA

Na osnovu principa superpozicije, opšti slučaj prostornog naponskog stanja štapa u okviru linearne analize, može da se razdvoji na: aksijalno naprezanje, torziju i savijanje u dve ortogonalne ravni i predstavlja četiri nezavisna problema. Korektivna matrica, preko koje se uzima u obzir uticaj polukrutih i ekscentričnih veza, ima uticaja samo na članove matrice krutosti elementa koji se odnose na savijanje. Posle određivanja matrice krutosti štapa na savijanje, na osnovu principa superpozicije, određuje se kombinovana matrica krutosti štapa usled savijanja, torzije i normalnih sila.

Na slici 1 prikazan je obostrano uklešteni štap u ravni, sa polukrutim i ekscentričnim vezama, i sa usvojenim generalisanim pomeranjima.



Slika 1 Štap u ravni sa polukrutim i ekscentričnim vezama
Fig. 1 Beam in a plane with semi-rigid and eccentric connections

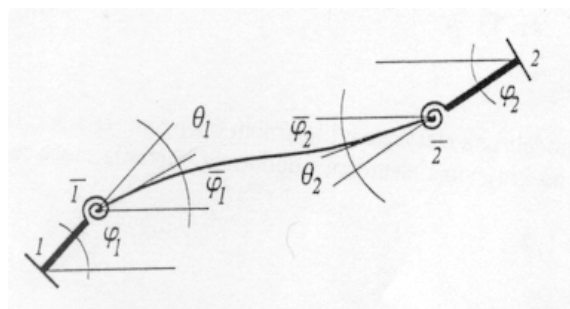
tions upon the final results of calculation, during the last years many scientific research are devoted to analysis of joint connections, see [2,5,6,7].

With regard to static analysis, dynamic analysis of buildings is not only more extensive, but it is also more complicated. The reason for that is the larger number of necessary parameters, including the time dimension, and also, in engineering sense, much more uncertain estimate of the input values. Dynamic loading of buildings may be given as: loading defined by some time-dependent force, seismic loading given by dynamic motion of supports, or seismic loading given by the spectral pseudo-acceleration curve. When the seismic loading of a building is defined by the spectral pseudo-acceleration in a given direction, approximate values of the maximum response are obtained, since the combination of modal responses is taking into account only the maximum values for various modes without regard of the time instances when the maximum occurred. However, for every effect one can also obtain direction of the spectrum of pseudo-acceleration for which that effect has the maximum value and then to obtain the extreme values of the effect due to a given spectrum of pseudo-acceleration, [8].

Buildings are continuous three-dimensional systems usually with complex distribution of stiffness, mass and loading. In their mathematical modeling one usually assumes the linear behavior which allows the principle of superposition.

2 MATHEMATICAL MODEL OF A BEAM ELEMENT WITH SEMI-RIGID AND ECCENTRIC CONNECTIONS

Due to the principle of superposition, a general case of the spatial state of stress of a beam, within the linear analysis, may be partitioned into the axial stresses, torsion and bending in the two orthogonal planes, thus representing the four independent problems. The corrective matrix, which takes care of the effect of semi-rigid and eccentric joints, has influence only upon the elements of the stiffness matrix that correspond to bending. After obtaining the stiffness matrix of a beam with respect to bending, due to the principle of superposition, the combined stiffness matrix of a beam considering combined bending, torsion and axial forces is determined.



Slika 2 Uglovi obrtanja deformisanog štapa
Fig. 2 Angles of rotation of deformed beam

Ponašanje polukrute veze, koje je definisano relacijom između momenta M i rotacije q na kraju elementa koji je polukruto vezan, usvaja se da je linearno.

Polukruta veza krajeva štapa modelirana je pomoću rotacionih opruga na krajevima, a ekscentričnost veze predstavljena je kratkim beskonačno krutim elementima. Formulacija elementa izvedena je tako da se može razdvojiti uticaj usled polukrute veze i uticaj ekscentrične veze.

2.1 Uticaj polukrutih veza na savijanje štapa u ravni

Razmatra se linearna polukruta veza. Veza između vertikalnog pomeranja ose štapa $v(x)$ i vektora generalisanih pomeranja $\bar{\mathbf{q}}$, na krajevima štapa, može da se prikaže preko interpolacionih funkcija kao

$$v(x) = \mathbf{N}(x)\bar{\mathbf{q}} \quad \mathbf{N}(x) = [N_1(x) \quad N_2(x) \quad N_3(x) \quad N_4(x)] \quad \bar{\mathbf{q}}^T = [\bar{v}_1 \quad \bar{J}_1 \quad \bar{v}_2 \quad \bar{J}_2] \quad (1)$$

pri čemu se za interpolacione funkcije $N_i(x)$ ($i = 1,2,3,4$) usvajaju Hermite-ovi polinomi prve vrste.

Obrtanje čvorova sistema j_i jednako zbiru obrtanja štapa \bar{J}_i i dodatnog obrtanja θ_i kraja štapa nastalog kao posledica polukrute veze (slika 2):

$$j_i = \bar{J}_i + q_i \quad i = 1, 2 \quad (2)$$

Jednačina (1), vodeći računa o jednačini (2), može se napisati kao

$$v(x) = \mathbf{N}(x) \begin{bmatrix} \bar{v}_1 \\ \bar{J}_1 \\ \bar{v}_2 \\ \bar{J}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{N}(x) \left(\begin{bmatrix} \bar{v}_1 \\ j_1 \\ \bar{v}_2 \\ j_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ q_1 \\ 0 \\ q_2 \end{bmatrix} \right) = \mathbf{N}(x)(\bar{\mathbf{q}} - \boldsymbol{\theta}) = \mathbf{N}(x)\bar{\mathbf{q}} \quad (3)$$

$$\bar{\mathbf{q}}^T = [\bar{v}_1 \quad j_1 \quad \bar{v}_2 \quad j_2]$$

$$\boldsymbol{\theta}^T = [0 \quad q_1 \quad 0 \quad q_2]$$

Vektor $\boldsymbol{\theta}$, u jednačini (3), može da se izrazi kao

$$\boldsymbol{\theta}^T = \left[0 \quad \frac{\bar{M}_1}{k_1} \quad 0 \quad \frac{\bar{M}_2}{k_2} \right]$$

gde je k_i rotaciona krutost opruge, a \bar{M}_i momenat u čvoru i štapa. Veza sila i pomeranja na krajevima štapa je

Fig. 1 represents the both and fixed beam in a plane, with semi-rigid and eccentric joints, displaying the adopted generalized displacements.

The behavior of a semi-rigid connection, defined by the bending moment M and rotation q , is assumed as linear. Semi-rigid connection at beam's ends is represented by the rotational springs at ends, while the eccentric connection is modeled by infinitely rigid elements. Formulation of the finite element is derived in such a way to be able to separate effects of semi-rigid and eccentric connections.

2.1 Effect of semi-rigid connections upon bending of a planar beam

Linear semi-rigid connection is considered. The relation between the lateral displacement of a beam axis and the vector of the generalized displacements $\bar{\mathbf{q}}$ at beam's ends may be presented by the interpolation functions as

The interpolation functions $N_i(x)$ ($i = 1,2,3,4$) are assumed as the Hermite's polynomials of the first kind.

Rotations of joints j_i are equal to the sum of beam rotation \bar{J}_i and the additional rotation θ_i of beam's end, as a consequence of the semi-rigid connection, see Fig. 2:

Equation (1), due to Eq. (2), may be written in the form

Vector $\boldsymbol{\theta}$, in Eq. (3), may be expressed as

$$q_i = \frac{\bar{M}_i}{k_i} \quad i = \bar{1}, \bar{2} \quad (4)$$

where k_i represents the rotational spring stiffness, while \bar{M}_i is the moment at joint i of the beam. The relationship between forces and displacements at beam's ends is given by

$$\begin{bmatrix} \bar{T}_1 \\ \bar{M}_1 \\ \bar{T}_2 \\ \bar{M}_2 \end{bmatrix} = \frac{EI}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l & -12 & 6l \\ 6l & 4l^2 & -6l & 2l^2 \\ -12 & -6l & 12 & -6l \\ 6l & 2l^2 & -6l & 4l^2 \end{bmatrix} \bar{\mathbf{q}} = \mathbf{K}_0 \bar{\mathbf{q}} \quad (5)$$

gde je: \mathbf{K}_0 matrica krutosti na savijanje obostrano uklještenog štapa, E Young-ov moduo elastičnosti i I moment inercije poprečnog preseka. Momenti na krajevima štapa u jednačini (5) mogu da se izraze u funkciji vektora $\tilde{\mathbf{q}}$. Iz jednačine (5), vodeći računa o jednačinama (3) i (4), dobijaju se momenti na krajevima štapa kao

$$\begin{bmatrix} \bar{M}_1 \\ \bar{M}_2 \end{bmatrix} = \frac{EI}{\Delta l^2} \begin{bmatrix} 6(1+2g_2) & 4l(1+3g_2) & -6(1+2g_2) & 2l \\ 6(1+2g_1) & 2l & -6(1+2g_1) & 4l(1+3g_1) \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{q}} \quad (6)$$

$$\Delta = 1 + 4g_1 + 4g_2 + 12g_1g_2$$

$$g_i = \frac{EI}{lk_i} \quad i = \bar{1}, \bar{2}$$

gde je g bezdimenzionalna rotaciona krutost opruge. Vektor rotacije $\boldsymbol{\theta}$, dat jednačinom (4), vodeći računa o jednačini (6), može sada da se napiše u obliku

$$\boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\bar{M}_1}{k_1} \\ 0 \\ \frac{\bar{M}_2}{k_2} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{6g_1}{l}(1+2g_2) & 4g_1(1+3g_2) & -\frac{6}{l}g_1(1+2g_2) & 2g_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{6g_2}{l}(1+2g_1) & 2g_2 & -\frac{6}{l}g_2(1+2g_1) & 4g_2(1+3g_1) \end{bmatrix} \boldsymbol{\phi} = \mathbf{G} \boldsymbol{\phi} \quad (7)$$

gde je \mathbf{G} korektivna matrica štapa sa polukrutim vezama na oba kraja.

Obzirom da je vektor rotacije $\boldsymbol{\theta}$ određen i dat jednačinom (7), može se eliminisati iz jednačine (3), te transverzalno pomeranje proizvoljne tačke ose štapa iznosi

$$v(x) = \mathbf{N}(x)(\mathbf{I} - \mathbf{G})\boldsymbol{\phi} \quad (8)$$

Za slučaj polukrutih centričnih veza je $\bar{v}_1 = v_1$ i $\bar{v}_2 = v_2$, a vektor $\boldsymbol{\phi} = \mathbf{q}$, pa je vektor interpolacionih funkcija za štap sa polukrutim centričnom vezama jednak

$$\bar{\mathbf{N}}(x) = \mathbf{N}(x)(\mathbf{I} - \mathbf{G}) \quad (9)$$

where: \mathbf{K}_0 is the bending stiffness matrix of both and fixed beam, E is the Young's modulus of elasticity and I is the moment of inertia of the cross section. Moments at beam's ends in Eq.(5) may be expressed as a function of the vector $\tilde{\mathbf{q}}$. From Eq.(5), taking care about Eqs.(3) and (4), one obtains the moments at beam's ends as

where g is the non-dimensional rotational spring stiffness. Vector of rotation $\boldsymbol{\theta}$, given by Eq.(4) and taking care about Eq. (6), may be written in the form

where \mathbf{G} is the corrective matrix of both and fixed beam with semi-rigid connections at both ends.

Since the rotation vector $\boldsymbol{\theta}$ is determined by Eq.(7), it may be eliminated from Eq.(3), so the lateral displacement of an arbitrary point along the beam element is given by

In the case of semi-rigid connections one has $\bar{v}_1 = v_1$ i $\bar{v}_2 = v_2$, and also vector $\boldsymbol{\phi} = \mathbf{q}$, so the vector of interpolation functions for a beam with semi-rigid and centric connections is given as

2.2 Uticaj ekscentričnih veza na savijanje štapa u ravni

Neka je sa \mathbf{q} označen vektor generalisanih pomeranja u čvorovima sistema tj.

$$\mathbf{q}^T = [v_1 \quad j_1 \quad v_2 \quad j_2] \quad (10)$$

Ekscentricitet čvornih veza štapa modeliran je kratkim idealno krutim elementima konačne dužine e_1 i e_2 (slika 1). Za male rotacije, veza između pomeranja krajeva štapa i pomeranja čvorova veze može se napisati u obliku

$$\mathbf{\bar{q}} = \begin{bmatrix} \bar{v}_1 \\ j_1 \\ \bar{v}_2 \\ j_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & e_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -e_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ j_1 \\ v_2 \\ j_2 \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & e_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -e_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \right) \mathbf{q} = (\mathbf{I} + \mathbf{E})\mathbf{q} \quad (11)$$

Matrica \mathbf{E} u izrazu (11) je korektivna matrica koja definiše krutu ekscentričnu vezu. Transverzalno pomeranje proizvoljne tačke ose štapa sa ekscentričnim vezama, stavljajući u jednačini (3) da je $\theta = 0$ i uzimajući u obzir izraz (11), iznosi

$$v(x) = \mathbf{N}(x)\mathbf{\bar{q}} = \mathbf{N}(x)(\mathbf{I} + \mathbf{E})\mathbf{q} = \bar{\mathbf{N}}(x)\mathbf{q} \quad (12)$$

gde je $\bar{\mathbf{N}}(x)$ vektor interpolacionih funkcija za ekscentričnu vezu.

2.3 Uticaj polukrutih i ekscentričnih veza na savijanje štapa u ravni

Zamenom izraza (11) u (8), deformaciona linija štapa, sa polukrutim i ekscentričnim vezama, može da se konačno izrazi kao

$$v(x) = \mathbf{N}(x)(\mathbf{I} + \mathbf{G}_1)\mathbf{q} = \hat{\mathbf{N}}(x)\mathbf{q} \quad \mathbf{G}_1 = (-\mathbf{G} + \mathbf{E} - \mathbf{G}\mathbf{E}) \quad (13)$$

2.4 Matrica krutosti na savijanje štapa u ravni

Matrica krutosti štapa na savijanje, sa polukrutim ekscentričnim vezama, može se izvesti preko deformacionog rada štapa koji iznosi

$$A = \frac{1}{2} \left\{ EI \int_0^l [v''(x)]^2 dx + k_1 q_1^2 + k_2 q_2^2 \right\} \quad (14)$$

$$l = L - (e_1 + e_2)$$

Prvi član jednačine (14) predstavlja potencijalnu energiju elastične deformacije štapa, a drugi i treći član potencijalnu energiju rotacionih opruga u polukrutim vezama štapa. Jednačina (14), vodeći računa o izrazima (7), (11) i (13), može da se izrazi u matičnom obliku kao

2.2 Effect of eccentric connections upon bending of a planar beam

Let the vector \mathbf{q} denotes the vector of generalized displacements in joints of the beam element, i.e.

$$\mathbf{q}^T = [v_1 \quad j_1 \quad v_2 \quad j_2] \quad (10)$$

Eccentricity of joint connections is represented by the short ideally rigid links of the finite lengths denoted as e_1 i e_2 (see Fig.1). For small rotations, the relationship between displacements of beam ends and displacements of joints, may be written in the form

$$\mathbf{\bar{q}} = \begin{bmatrix} \bar{v}_1 \\ j_1 \\ \bar{v}_2 \\ j_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & e_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -e_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ j_1 \\ v_2 \\ j_2 \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & e_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -e_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \right) \mathbf{q} = (\mathbf{I} + \mathbf{E})\mathbf{q} \quad (11)$$

Matrix \mathbf{E} in Eq. (11) is the corrective matrix defining the rigid eccentric connection. The lateral displacement of an arbitrary point along the axis of the beam element with eccentric connections, inserting into Eq. (3) that $\theta = 0$ and taking into account Eq. (11), is given by

$$v(x) = \mathbf{N}(x)\mathbf{\bar{q}} = \mathbf{N}(x)(\mathbf{I} + \mathbf{E})\mathbf{q} = \bar{\mathbf{N}}(x)\mathbf{q} \quad (12)$$

where $\bar{\mathbf{N}}(x)$ is the vector of interpolation functions for eccentric joints.

2.3 Effect of semi-rigid and eccentric connections upon bending of a planar beam

Substituting expression (11) into Eq. (8), deformed axis of a beam element with semi-rigid and eccentric connections may be finally expressed as

$$v(x) = \mathbf{N}(x)(\mathbf{I} + \mathbf{G}_1)\mathbf{q} = \hat{\mathbf{N}}(x)\mathbf{q} \quad \mathbf{G}_1 = (-\mathbf{G} + \mathbf{E} - \mathbf{G}\mathbf{E}) \quad (13)$$

2.4 Bending stiffness matrix of a planar beam

Bending stiffness matrix of a beam element with semi-rigid and eccentric connections may be derived through deformational work of a beam given by

$$A = \frac{1}{2} \left\{ EI \int_0^l [v''(x)]^2 dx + k_1 q_1^2 + k_2 q_2^2 \right\} \quad (14)$$

$$l = L - (e_1 + e_2)$$

The first term in Eq. (14) represents the potential energy of elastic deformation of a beam, while the second and the third terms represent the potential energy of rotational springs at the semi-rigid connections at beam ends. Eq. (14), considering expressions (7), (11) and (13), might be expressed in the matrix form as

$$A = \frac{1}{2} \mathbf{q}^T \left[EI \int_0^l \left[\hat{\mathbf{N}}(x)^T \right]'' \left[\hat{\mathbf{N}}(x) \right]'' dx + \hat{\mathbf{G}}^T \mathbf{S} \hat{\mathbf{G}} \right] \mathbf{q} = \frac{1}{2} \mathbf{q}^T \mathbf{K} \mathbf{q} \quad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\hat{\mathbf{G}} = \mathbf{G}(\mathbf{I} + \mathbf{E})$$

U jednačini (15) \mathbf{K} predstavlja matricu krutosti štapa sa ekscentričnim i polukrutim vezama na savijanje. Izraz \mathbf{K} iz jednačine (15), vodeći računa o izrazu za $\hat{\mathbf{N}}(x)$ u jednačini (13), može da se napiše kao

In Eq. (15) \mathbf{K} represents the bending stiffness matrix of a beam with eccentric and semi-rigid connections. Expression for \mathbf{K} in Eq.(15), having in mind the expression for $\hat{\mathbf{N}}(x)$ in Eq.(13), may be written as

$$\mathbf{K} = (\mathbf{I} + \mathbf{G}_1)^T \mathbf{K}_0 (\mathbf{I} + \mathbf{G}_1) + \hat{\mathbf{G}}^T \mathbf{S} \hat{\mathbf{G}} \quad (16)$$

$$\mathbf{K}_0 = EI \int_0^l [\mathbf{N}'']^T [\mathbf{N}''] dx$$

gde je \mathbf{K}_0 matrica krutosti štapa sa krutim centričnim vezama.

where \mathbf{K}_0 represents the stiffness matrix of a beam with rigid and centric connections.

3 MODALNA ANALIZA

Ova metoda je primjenjiva ako je vremenska zavisnost sila pobude svih masa ista ili srazmerno ista, što u slučaju seizmičkog opterećenja zadovoljava uslov.

Pretpostavlja se da je seizmičko opterećenje dato preko vektora generalisanog dinamičkog pomeranja oslonaca $\mathbf{a}(t)$. Ovaj vektor sastoji se od vektora dinamičkog pomeranja oslonaca $\mathbf{a}_d(t)$ i vektora dinamičkog obrtanja oslonaca $\mathbf{a}_\phi(t)$. U proračunu se pretpostavlja da je vektor dinamičkog obrtanja oslonaca jednak nula vektoru. Vektor dinamičkog pomeranja oslonaca $\mathbf{a}_d(t)$ ima proizvoljan pravac u prostoru (slika 4). Vrh vektora $\mathbf{a}_d(t)$ jedne tačke na površini zemlje za vreme zemljotresa opisuje proizvoljnu krivu u prostoru. Vektor $\mathbf{a}_d(t)$ može da se razloži u pogodnom koordinatnom sistemu 123 na tri komponente, te vektor generalisanog dinamičkog pomeranja oslonaca iznosi

3 MODAL ANALYSIS

This method may be applied if the time dependance of excitation forces of all masses is the same or relatively the same, which, in the case of an earthquake is satisfied.

It is assumed that the seismic loading is given by the vector of generalized dynamic displacement of support $\mathbf{a}(t)$. This vector consists of a vector of dynamic support displacements $\mathbf{a}_d(t)$ and a vector of dynamic support rotations $\mathbf{a}_\phi(t)$. It is assumed that the vector of support rotations is equal to a zero vector. Vector of dynamic support displacements $\mathbf{a}_d(t)$ has an arbitrary direction in space (Fig. 4). The tip of the vector $\mathbf{a}_d(t)$ of a point on the earth's surface during earthquake is inscribing an arbitrary curve in space. Vector $\mathbf{a}_d(t)$ may be projected into three orthogonal components with respect to a convenient coordinate system 123, so the vector of generalized dynamic support displacements may be presented as

$$\mathbf{a}^T(t) = [\mathbf{a}_d^T(t) \quad \mathbf{a}_j^T(t)] = [\mathbf{a}_d^T(t) \quad \mathbf{0}]$$

$$\mathbf{a}_d^T(t) = [a_1 \quad a_2 \quad a_3]$$

$$\mathbf{a}_j^T(t) = [0 \quad 0 \quad 0] = \mathbf{0} \quad (17)$$

Kretanje konstrukcije usled seizmičkog opterećenja tretira se kao složeno kretanje. Ukupni vektor pomeranja $\mathbf{q}_{j,abs}$ svake mase j ($j=1,2,\dots,N$), sastoji se od vektora prenosnog pomeranja $\mathbf{q}_{j,k}(t)$ koje je jednako seizmičkom pomeranju tla i vektora relativnog pomeranja $\mathbf{q}_j(t)$ (slika 3), i iznosi

The motion of the structure due to seismic excitation is considered as the compound motion. The absolute displacement vector $\mathbf{q}_{j,abs}$ of each mass j ($j=1,2,\dots,N$), consists of the vector of imposed displacement $\mathbf{q}_{j,k}(t)$ which is equal to the seismic soil displacement at the base of the building, and the vector of relative displacement $\mathbf{q}_j(t)$ (Fig. 3), so, it is

$$\mathbf{q}_{j,abs} = \mathbf{q}_{j,k} + \mathbf{q}_j \quad (18)$$

Neka osa 1 koordinatnog sistema 123 u kojem je dat vektor dinamičkog pomeranja oslonaca zaklapa ugao a sa globalnom osom X, a osa 3 je u pravcu ose Z (slika 4). Ako se pretpostavi da je broj generalisanih pomeranja čvora šest, vektor prenosnog pomeranja čvora j u pravcu osa globalnog koordinatnog sistema iznosiće

$$\mathbf{q}_{j,k} = \begin{bmatrix} \Gamma & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{a}_d \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \mathbf{B}_j \mathbf{a}$$

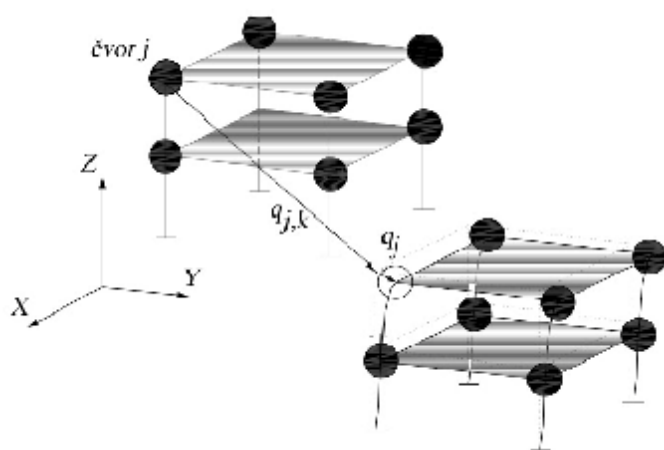
gde je Γ matrica transformacije prenosnog pomeranja čvora iz koordinatnog sistema 123 u koordinatni sistem XYZ. Vektor ukupnog (apsolutnog) pomeranja sistema sada iznosi

$$\mathbf{q}_{abs}(t) = \mathbf{B}\mathbf{a}(t) + \mathbf{q}(t)$$

U slučaju seizmičkog opterećenja, inercijalne sile zavise od apsolutnog ubrzanja, sile prigušenja od relativne brzine i restitucione sile od relativnog pomeranja, a spoljašnje dinamičke sile u čvorovima sistema su jednake nuli. Dinamička jednačina ravnoteže sistema, odn. diferencijalna jednačina kretanja, usled seizmičkog opterećenja, glasi

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}_{abs} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{0} \quad (21)$$

gde je: \mathbf{M} matrica masa, \mathbf{C} matrica viskoznog prigušenja i \mathbf{K} matrica krutosti sistema. Jednačina (21), vodeći računa o izrazu (20), glasi



Slika 3 Pomeranje objekta pri zemljotresu
Fig. 3 Displacement of a structure due to an earthquake

Let the axis 1 of the coordinate system 123, which is used as the reference frame for support displacement, forms the angle a with the global X axis, and the axis 3 is in direction of the vertical Z axis (Fig. 4). If one assumes that the number of generalized displacements of a joint is six, the vector of imposed displacements of joint j with respect to the axes of the global coordinate system may be given as

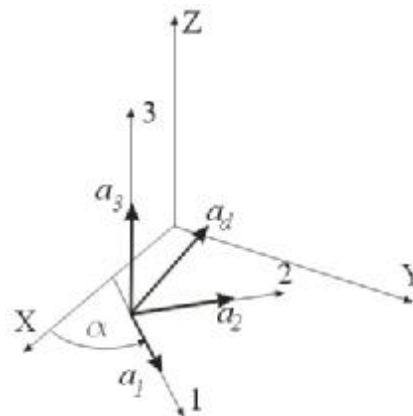
$$\Gamma = \begin{bmatrix} \cos a & -\sin a & \\ \sin a & \cos a & \\ & & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

where Γ represents the transformation matrix of imposed motion at considered joint from the coordinate system 123 into the coordinate system XYZ. The vector of the total (i.e. absolute) displacement is given as

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_{abs}^T &= [\mathbf{q}_{1,abs}^T \quad \mathbf{K} \quad \mathbf{q}_{j,abs}^T \quad \mathbf{K} \quad \mathbf{q}_{N,abs}^T] \\ \mathbf{B}^T &= [\mathbf{B}_1^T \quad \mathbf{K} \quad \mathbf{B}_j^T \quad \mathbf{K} \quad \mathbf{B}_N^T] \\ \mathbf{q}^T &= [\mathbf{q}_1^T \quad \mathbf{K} \quad \mathbf{q}_j^T \quad \mathbf{K} \quad \mathbf{q}_N^T] \end{aligned} \quad (20)$$

In the case of a seismic loading, the inertial forces depend upon the absolute acceleration, viscous dissipative forces upon the relative velocity and the restitution forces upon the relative displacement, while the external dynamic nodal forces are equal to zero. Dynamic equilibrium equations, i.e. differential equations of motion, due to seismic loading, are given in the matrix form as

where: \mathbf{M} is the mass matrix, \mathbf{C} the matrix of viscous damping and \mathbf{K} the stiffness matrix. Eq. (21), considering expression (20), becomes



Slika 4 Razlaganje vektora dinamičkog pomeranja oslonaca \mathbf{a}_d
Fig. 4 Decomposition of the vector of dynamic support displacement \mathbf{a}_d

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = -\mathbf{M}\mathbf{B}\ddot{\mathbf{z}} \quad (22)$$

Matrica prigušenja \mathbf{C} usvojena je, na uobičajen način, kao linearna kombinacija matrice masa i matrice krutosti:

$$\mathbf{C} = \alpha\mathbf{M} + \beta\mathbf{K} \quad a = \frac{2x w_1 w_n}{w_1 + w_n} \quad b = \frac{2x}{w_1 + w_n} \quad (23)$$

U jednačini (23) se koeficijenti α i β obično računaju tako što se za dve svojstvene frekvencije w_1 i w_n , za dva različita svojstvena oblika, usvaja da je relativno prigušenje isto: $x = x_1 = x_n$.

Sistem simultanih diferencijalnih jednačina (22), primenom metode modalne analize, može se transformisati u sistem međusobno nezavisnih jednačina od kojih je svaka sa jednim stepenom slobode. Da bi se izvršila ova transformacija, prvo je potrebno uraditi linearnu transformaciju vektora nepoznatih generalisanih pomeranja $\mathbf{q}(t)$, koristeći glavne forme sopstvenih neprigušenih oscilacija sistema, preko modalne matrice \mathbf{F} , koja je nezavisna od vremena, te se dobija da je

$$\mathbf{q}(t) = \mathbf{\Phi}\boldsymbol{\eta}(t) \quad (24)$$

gde je $\boldsymbol{\eta}(t)$ vektor normalnih koordinata. Modalna matrica \mathbf{F} jednaka je

$$\mathbf{\Phi} = [\mathbf{\Phi}_1 \quad \mathbf{\Phi}_2 \quad \dots \quad \mathbf{\Phi}_n] \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (25)$$

gde je $\mathbf{\Phi}_i$ svojstveni (karakteristični, modalni) vektor za svojstvenu frekvenciju ω_i . Unoseći izraze (24) u jednačinu (22) i množeći je sa leve strane sa \mathbf{F}^T dobija se

$$\mathbf{\Phi}^T \mathbf{M} \mathbf{\Phi} \ddot{\boldsymbol{\eta}}(t) + \mathbf{\Phi}^T \mathbf{C} \mathbf{\Phi} \dot{\boldsymbol{\eta}}(t) + \mathbf{\Phi}^T \mathbf{K} \mathbf{\Phi} \boldsymbol{\eta}(t) = -\mathbf{\Phi}^T \mathbf{M} \mathbf{B} \ddot{\mathbf{z}} \quad (26)$$

Imajući u vidu proporcionalnost (23) i ortogonalnost svojstvenih vektora, dobija se da je

$$\mathbf{\Phi}^T \mathbf{C} \mathbf{\Phi} = \text{diag}(2x w_i) \quad (27)$$

pri čemu su modalni vektori još i ortonormirani u odnosu na matricu mase, tako da je

$$\mathbf{\Phi}^T \mathbf{M} \mathbf{\Phi} = \mathbf{I} \quad \mathbf{\Phi}^T \mathbf{K} \mathbf{\Phi} = \text{diag}(w_i^2) \quad (28)$$

Sistem jednačina (26), vodeći računa o jednačinama (27) i (28), prelazi u skup nezavisnih jednačina po normalnim koordinatama ($i=1,2,\dots,n$):

$$\ddot{h}_i + 2x w_i \dot{h}_i + w_i^2 h_i = -\mathbf{\Phi}_i^T \mathbf{M} \mathbf{B} \ddot{\mathbf{z}} \quad (29)$$

Damping matrix \mathbf{C} is assumed in the usual way as the linear combination of the mass and stiffness matrices:

The coefficients α and β in Eq.(23) are usually determined in such a way that for the two natural frequencies w_1 and w_n , corresponding to two different natural modes, an equal relative damping is adopted: $x = x_1 = x_n$.

The system of simultaneous equations (22), using the modal analysis, may be transformed into the system of mutually independent equations, each one corresponding to one degree of freedom. In order to perform the modal analysis, the corresponding modal transformation is done, that is the generalized displacements $\mathbf{q}(t)$ are expressed as the linear combination of the modal matrix \mathbf{F} , which is independent of time, and the new modal, or normal, coordinates $\boldsymbol{\eta}(t)$:

where $\boldsymbol{\eta}(t)$ is the vector of normal (or modal) coordinates. Modal matrix \mathbf{F} is given as

where $\mathbf{\Phi}_i$ is the natural vector (eigen vector, or modal vector) corresponding to the eigen-frequency ω_i . Inserting expressions (24) into Eq. (22) and premultiplying by \mathbf{F}^T one obtains

Having in mind the linear combination (23) and orthogonality of eigen-vectors, one obtains

while the modal vectors are also orthonormalized with respect to the mass matrix, so

The system of equations (26), having in mind relations (27) and (28), becomes the set of independent modal (or normal) equations ($i=1,2,\dots,n$):

Rešenje ove jednačine može da bude prikazano preko integrala konvolucije

The solution of each modal equation may be given with use of the convolution integral in the form

$$h_i = -\frac{\Phi_i^T \mathbf{M} \mathbf{b}}{w_i} \int_0^t \ddot{x}(t) e^{-x_i w_i (t-t)} \sin w_i (t-t) dt \quad (30)$$

U jednačini (30), vodeći računa o jednačinama (23), (27) i (28), prigušenje \dot{h} -tog tona oscilovanja iznosi

Keeping in mind equations (23), (27) and (28), the relative damping of the mode i in Eq.(30) is given by

$$x_i = x \frac{w_i + \frac{w_1}{w_n} w_n}{w_1 + w_n} \quad (31)$$

4 SPEKTRALNA ANALIZA

Spektar odgovora može se upotrebiti samo sa modalnom analizom. Detaljniji prikaz spektralne analize, ali i drugih savremenih postupaka analize uticaja zemljotresa, dat je u radu [9], dok je analiza vrednovanja aseizmičkog projektovanja data u [10]. O pristupu seizmičke analize u skladu sa odredbama Evrokoda 8, dato je u [12], dok rad [11] posebno posmatra analizu vremenskog odgovora za zadati akcelerogram. Pri izvođenju izraza koji slede, pretpostavljeno je da pobuđivanje konstrukcije može da bude samo u horizontalnoj ravni i to u pravcu samo jedne od osa 1 ili 2. Ovo ograničenje pojednostavljuje izvođenje, ali ne ograničava metodu. Pošto se radi u elastičnom području, važi zakon superpozicije i rezultati proračuna za pojedine pravce pobuđivanja mogu da se sabiraju. Pretpostavlja se da je pobuda (odn. ubrzanje) u pravcu ose 1 i da iznosi $\ddot{x}(t)$. Izraz (19) se transformiše u

4 SPECTRAL ANALYSIS

The response spectrum may be used only in the context of the modal analysis. More detailed presentation of the spectral analysis, and also other contemporary methods of seismic analysis, is given in [9], while the analysis of evaluation of aseismic design solutions is given in [10]. Seismic analysis according to Eurocode 8 provisions is given in [12], while [11] is addressing the time history response for a given accelerograms. In derivation of the following expressions it is assumed that the seismic excitation of the structure is acting only in the horizontal plane and in direction of only one axis, 1 or 2. This restriction simplifies derivation, but does not restrict the method itself. Since the elastic behavior is assumed, the principle of superposition is valid, so the results obtained separately for various directions may be added. It is assumed that the excitation (i.e. acceleration) is acting in direction of the axis 1 and is given as $\ddot{x}(t)$. Expression (19) is transformed into

$$\mathbf{B}_j \ddot{x}(t) = \mathbf{b}_j \ddot{x}(t) \quad \mathbf{b}_j^T = [\cos a \quad \sin a \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \quad (32)$$

Jednačina (30) može, vodeći računa o izrazu (32), da se napiše kao

Eq. (30), having in mind expression (32), may be written as

$$h_i = -\frac{\Phi_i^T \mathbf{M} \mathbf{b}}{w_i} \int_0^t \ddot{x}(t) e^{-x_i w_i (t-t)} \sin w_i (t-t) dt = -\Gamma_i \frac{D_i(t)}{w_i} \quad (33)$$

$$\mathbf{b}^T = [\mathbf{b}_1^T \quad \mathbf{K} \quad \mathbf{b}_j^T \quad \mathbf{K} \quad \mathbf{b}_N^T]$$

Sa D_i je označen integral. Γ_i je faktor participacije definisan izrazom

The integral in Eq. (33) is denoted as D_i while Γ_i is the participation factor defined by

$$\Gamma_i = \Phi_i^T \mathbf{M} \mathbf{b} \quad (34)$$

U slučaju opterećenja konstrukcije spektrom odgovora, kod sistema sa jednim stepenom slobode pomeranja, vrede izrazi

When the structure is loaded by the response spectrum, for the system with one degree of freedom, the following relations hold

$$|q(t)|_{\max} = S_d = \frac{S_{pv}}{w} = \frac{S_{pa}}{w^2} \quad (35)$$

gde je S_d spektar relativnih pomeranja, S_{pv} spektar pseudobrzine i S_{pa} spektar pseudoubiranja. Svi spektri S su funkcije kružne frekvencije i prigušenja $S=S(w,x)$, ali, alternativno, mogu da budu izraženi i u funkciji svojstvenog perioda i prigušenja.

Maksimalna veličina količnika $D_i(t)/\omega_i$ po analogiji sa sistemom sa jednim stepenom slobode, jednaka je veličini u spektru pomeranja, za kružnu frekvenciju w_i i za prigušenje x_i

$$S_{di} = S_{di}(w_i, x_i) = \left| \frac{D_i(t)}{w_i} \right|_{\max} \quad (36)$$

Na taj način, maksimalna veličina h_i data izrazom (33), vodeći računa o izrazu (36), može da se napiše u obliku

$$h_{i,\max} = \Gamma_i S_{di} \quad (37)$$

Vektor maksimalnih generalisanih pomeranja i vektor maksimalnih unutrašnjih sila (doprinos vibracija u tonu i) u osnovnom koordinatnom sistemu su, imajući u vidu (24), dati sa

$$\mathbf{q}_{i,\max} = \Phi_i h_{i,\max} = \Phi_i \Gamma_i S_{di} \quad (38)$$

$$\mathbf{S}_i = \mathbf{K} \mathbf{q}_{i,\max} = \mathbf{M} w_i^2 \mathbf{q}_{i,\max} = \mathbf{M} \Phi_i \Phi_i^T \mathbf{M} \mathbf{b}_{pai} \quad (39)$$

Veličina S_{pai} je veličina u spektru pseudoubiranja. Indeks i odnosi se na ton vibracija i . Vektor unutrašnjih sila \mathbf{S}_i koristi se kao ekvivalentno statičko opterećenje (seizmičke sile) statičkog modela konstrukcije.

Kao krajnji rezultat analize, potrebno je poznavati ukupan uticaj (presečne sile, pomeranja) usled svih tonova vibracija. Kombinacije uticaja pojedinih tonova, kod primene spektra odgovora, moguće je načiniti samo približno. Kao jedna od metoda kombinacije upotrebljava se kompletna kvadratna kombinacija (*eng.* Complete Quadratic Combination) ili skraćeno CQC. Ukupni vektor uticaja \mathbf{u} (presečne sile, pomeranja) u konstrukciji usled svih modova oscilovanja, iznosi

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ \mathbf{M} \\ u_k \\ \mathbf{M} \\ u_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\mathbf{u}_1^T \Delta \mathbf{u}_1} \\ \mathbf{M} \\ \sqrt{\mathbf{u}_k^T \Delta \mathbf{u}_k} \\ \mathbf{M} \\ \sqrt{\mathbf{u}_n^T \Delta \mathbf{u}_n} \end{bmatrix}$$

where S_d is the spectrum of relative displacements, S_{pv} the spectrum of pseudovelocity and S_{pa} the spectrum of pseudoacceleration. All spectrums S are the functions of the circular frequency and the relative damping $S=S(w,x)$, but, alternatively, may be expressed as the functions of the natural period and damping.

The maximum value of the ratio $D_i(t)/\omega_i$ in analogy with the system with one degree of freedom, is equal to the corresponding value in the displacement spectrum, for a given modal circular frequency w_i and for a modal damping x_i

Therefore, the maximum value of h_i given by expression (33), and having in mind expression (36), may be written in the form

Due to transformation (24), the vector of maximum generalized displacements and the vector of maximum internal forces (contribution of the natural mode i), in the initial generalized coordinates, are given, having in mind transformation (24), as

The quantity S_{pai} is the value in the spectrum of pseudoaccelerations and the index i corresponds to the natural mode number i . The vector of internal forces \mathbf{S}_i is used as the equivalent static loading (i.e. seismic forces) in the static model of the structure.

As the final result of the analysis, it is necessary to obtain the complete effects (internal forces, displacements) due to all natural modes. The proper combinations of the contributions of particular natural modes in the overall response, using the spectral approach, may be determined only approximately. As one of the modal combinations, the Complete Quadratic Combination (or CQC), is used here. The complete vector of some effect in the structure (internal forces, displacements), denoted as \mathbf{u} , as the corresponding contribution of all natural modes, is given as

$$\mathbf{u}_k^T = [u_{1,k} \quad \mathbf{K} \quad u_{i,k} \quad \mathbf{K} \quad u_{n,k}] \quad (40)$$

gde je \mathbf{u}_k vektor k -tog uticaja u konstrukciji usled svih modova oscilovanja, a član $u_{i,k}$ vektora \mathbf{u}_k je vrednost uticaja k za i -ti ton oscilovanja i član u_k vektora \mathbf{u} je ukupni k -ti uticaj usled svih modova oscilovanja. Δ je matrica korelacije, prema Der Kiureghian-u [3], i iznosi

$$\Delta = \begin{bmatrix} \rho_{11} & \mathbf{L} & \rho_{1m} \\ \mathbf{M} & r_{ij} & \mathbf{M} \\ \rho_{m1} & \mathbf{L} & \rho_{mm} \end{bmatrix} \quad \rho_{ij} = \frac{8\sqrt{\xi_i \xi_j} (\xi_i + r_j \xi_j) r^{3/2}}{(1-r^2)^2 + 4\xi_i \xi_j r(1+r^2) + 4(\xi_i^2 + \xi_j^2) r^2} \quad r = \frac{\omega_j}{\omega_i} \quad (41)$$

$$0 \leq r_{ij} \leq 1$$

Izraz (41) nije upotrebljiv kada je $x = 0, r = 1$ i tada se uzima da je $r_{ij} = 1$.

where \mathbf{u}_k is the vector of the k -th effect in the structure due to all modal contributions, and the term $u_{i,k}$ of the vector \mathbf{u}_k is the value of the effect k for the i -th mode of oscillation and the term u_k of the vector \mathbf{u} is the total k -th effect due to all modes of vibrations. Finally, Δ is the correlation matrix, according to Der Kiureghian [3], and is given by

Expression (41) may not be used when $x = 0, r = 1$, so in that case, one uses $r_{ij} = 1$.

5 EKSTREMNE VREDNOSTI UTICAJA

Pretpostaviće se da spektralno opterećenje, dato preko krivih S_1 i S_2 , deluje na konstrukciju u dva ortogonalna pravca, u horizontalnoj ravni, istovremeno.

Vektor rezultujućih uticaja $\bar{\mathbf{u}}$, čije su komponente vrednosti uticaja \bar{u}_1 usled opterećenja S_1 koje deluje pod uglom a i \bar{u}_2 usled opterećenja S_2 koje deluje pod uglom $a + 90$, iznosi

5 EXSTREME VALUES OF EFFECTS

It is assumed that the spectral loading, defined by curves S_1 and S_2 , is acting upon the structure in the horizontal plane, along the two orthogonal directions, simultaneously.

The vector of the resulting effect $\bar{\mathbf{u}}$, whose components are denoted as \bar{u}_1 due to loading S_1 which is acting along the angle a (with respect to X axis) and \bar{u}_2 due to loading S_2 which is acting along the angle $a + 90$, is given as

$$\bar{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} \bar{u}_1 \\ \bar{u}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \pm \cos a & \pm \sin a \\ \pm \cos a & \pm \sin a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1^0 \\ u_1^{90} \\ u_2^0 \\ u_2^{90} \end{bmatrix} \quad (42)$$

gde je u_i^a vrednost uticaja u usled spektralnog opterećenja S_i ($i=1,2$) koje deluje pod uglom a ($a = 0, 90$) i računa se prema izrazima datim u poglavlju 4. Predznak \pm u jednačini (42) je neohodan pošto vrednosti u_i^a gube predznake u modalnoj kombinaciji. Pošto su S_1 i S_2 statički nezavisni, ukupna vrednost uticaja u je

where u_i^a is the value of the effect u due to spectral loading S_i ($i=1,2$) which is acting along the angle a ($a = 0, 90$) and is determined according to expressions given in the section 4. The sign \pm in Eq. (42) is necessary since the values u_i^a are losing their signs in the modal combination. Since S_1 and S_2 are statically independent, the total value of the effect u is given as

$$u(a) = \sqrt{\bar{\mathbf{u}}^T \bar{\mathbf{u}}} \quad (43)$$

Ugao za koji će neki uticaj u imati ekstremnu vrednost, nalazi se iz uslova [8]

The angle that corresponds to the case when some effect u has an extreme value may be obtained from the condition, see [8],

$$\frac{\partial u(a)}{\partial a} = 0 \quad (44)$$

Iz izraza (44) dobija se, vodeći računa o izrazima (42) (ispred sinusa i kosinusa ugla uzima se predznak +) i (43), izraz iz kojega se računa kritični ugao a_{cr} za koji uticaj u ima ekstremnu vrednost i iznosi

$$\tan(2a_{cr}) = \frac{2(u_1^0 u_1^{90} + u_2^0 u_2^{90})}{((u_1^0)^2 - (u_1^{90})^2) + ((u_2^0)^2 - (u_2^{90})^2)} \quad (45)$$

Svaki uticaj može da ima različitu vrednost kritičnog ugla usled spektralnog opterećenja. Zamenom ugla a_{cr} u izrazu (42), iz izraza (43) može da se izračuna ekstremna vrednost uticaja.

6 PARAMETARSKA ANALIZA

Za parametarsku analizu korišćen je razvijeni program ELAN [2] koji je napisan u jeziku C++ i omogućava linearnu i nelinearnu analizu konstrukcija usled statičkog i dinamičkog opterećenja.

Da se u analizi uticaja (pomeranja i presečne sile), usled promene fleksibilnosti i ekscentričnosti veza na seizmički odgovor konstrukcije, ne bi koristile stvarne numeričke vrednosti uticaja, uvode se bezdimenzionalne veličine: koeficijent krutosti, koeficijent ekscentričnosti i normalizovani uticaj. Pri tome se definišu dve vrste dijagrama [8]:

– Dijagram A: *Koeficijent krutosti (K_k) - Normalizovani uticaj usled promene koeficijenta krutosti ($N_{k,u}$)*. Uticaji u konstrukciji su dati kao funkcije koeficijenta krutosti veze koja je definisana kao

$$K_k = \frac{1}{1 + \frac{3EI}{lk}} \quad (46)$$

gde je k krutost veze. Uticaji kod ovog dijagrama se normalizuju deljenjem njihovih vrednosti sa vrednostima dobijenim za konstrukciju sa krutim vezama. Normalizovani uticaj je dat kao

$$N_{k,ut} = \frac{u_{Kk}}{u_{Kk=1}} \quad (47)$$

gde je u_{Kk} posmatrani uticaj (oznaka $ut=U$ za pomeranja, $ut=F$ za sile) za koeficijent krutost veze K_k , a $u_{Kk=1}$ je isti taj uticaj za $K_k=1$.

– Dijagram B: *Koeficijent ekscentričnosti (K_e) - Normalizovani uticaj usled promene koeficijenta ekscentričnosti ($N_{e,u}$)*. Uticaji u konstrukciji su dati kao funkcije koeficijenta ekscentričnosti veze. Koeficijent ekscentričnosti veze dat je kao

Using expression (44), taking care about expressions (42) (in front of sine and cosine terms the sign + is assumed) and also (43), one obtains the expression from which one might determine the critical angle a_{cr} that corresponds to the extreme value of the effect u and is given by

Every effect may have the different value of the corresponding critical angle due to spectral loading. Substituting the angle a_{cr} in expression (42), using (43), one might determine the corresponding extreme value of considered effect.

6 PARAMETRIC ANALYSIS

For the parametric numerical analysis, the corresponding computer code ELAN [2] is used. The code, developed using C++ language, enables the linear and non-linear static and dynamic analysis of framework building structures.

When analyzing effects (displacements and cross-sectional forces) due to change of flexibility and eccentricity of joints under seismic loading, in order to avoid the real numerical values, the corresponding non-dimensional values are introduced: coefficient of joint rigidity, coefficient of joint eccentricity and normalized considered effect. Two types of diagrams are defined, according to [8]:

– Diagram A: *Coefficient of rigidity (K_k) - Normalized effect due to change of coefficient of rigidity ($N_{k,u}$)*.

Structural effects are given as functions of the coefficient of joint rigidity, which is defined as

where k is the joint rigidity. Effects are normalized by dividing their values by the value of the same effect in the case of a structure with rigid connections. Normalized effect is given as

where u_{Kk} is considered effect (notation $ut=U$ for displacements, $ut=F$ for forces) for the coefficient of joint rigidity K_k , while $u_{Kk=1}$ is the same effect for $K_k=1$.

– Diagram B: *Coefficient of eccentricity (K_e) - Normalized effect due to change of the coefficient of eccentricity ($N_{e,u}$)*. Structural effects are given as functions of the coefficient of joint eccentricity. The coefficient of joint eccentricity is given as

$$K_e = \frac{l_k}{l} \quad (48)$$

gde je l_k dužina krute zone u čvoru, a l dužina štapa. Uticaji kod ovog dijagrama se normalizuju deljenjem njihovih vrednosti sa vrednostima dobijenim za konstrukciju bez ekscentriciteta. Normalizovani uticaj iznosi

$$N_{e,ut} = \frac{u_{K_e}}{u_{K_e=0}} \quad (49)$$

gde je u_{K_e} posmatrani uticaj za koeficijent ekscentricnosti K_e , a $u_{K_e=0}$ isti taj uticaj za $K_e=0$.

U parametarskoj analizi se, kao uticaji, analiziraju ekstremni uticaji u konstrukciji, koji se računaju prema postupku datom u poglavlju 5. Normalizovane vrednosti ekstremnih uticaja dobijaju se iz izraza (47) odnosno (49).

Kao primer, na kojem je urađena parametarska analiza, razmatrana je nesimetrična zgrada sa tri kule različite spratnosti. Glavna kula ima deset spratova, dok sporedne kule imaju četiri, odnosno šest spratova (slika 5). Osovinski razmak stubova u X i Y pravcu je 8 metara, a međuspratna visina je 4 metra. Karakteristike poprečnih preseka su: grede: površina $F=0.306m^2$, momenat inercije oko lokalne ose paralelne ravni XOY $I = 0.002569 m^4$; stubovi: površina $F=0.1224m^2$, momenat inercije oko obe lokalne ose $I = 0.001798 m^4$. Young-ov moduo elastičnosti materijala je $E = 2.1 \times 10^8 kNm^{-2}$ (čelik). Ekscentricitet i krutost veza uzimana je samo na spoju greda i stubova.

Uticaji u konstrukciji su analizirani za opterećenja data preko krivih spektra pseudoubzranja (slika 6a): kriva S_{Ec1} prema [1], sa parametrima: $\beta=1.2ms^{-2}$, srednje tlo (tip B), faktor ponašanja $q=1$, $\xi=0\%$; kriva S_{Ec2} prema [1], sa parametrima: $\beta=1.2ms^{-2}$, srednje tlo (tip B), faktor ponašanja $q=1$, $\xi=5\%$; kriva S_{Yu} prema [4], sa parametrima: II kategorija tla, II kategorija objekta, tip konstrukcije 1 i IX seizmičko područje. Pošto su, pri analizi preko dijagrama $K_k \cdot N_{k,ut}$ i $K_e \cdot N_{e,ut}$, od interesa samo normalizovane vrednosti uticaja, kao opterećenje mogu da se koriste normalizovane vrednosti spektara pseudoubzranja (slika 6b). Ova normalizacija je izvršena u odnosu na maksimalnu vrednost pseudoubzranja za svaki dijagram posebno. Osim normalizovanih krivih spektara pseudoubzranja S_{Ec1} , S_{Ec2} i S_{Yu} uveden je i jedinični spektar pseudoubzranja S_C , da bi se iz proračuna eliminisao uticaj oblika krive spektra pseudoubzranja, i na taj način dobile granične vrednost normalizovanih uticaja u konstrukciji sa fleksibilnim i ekscentričnim vezama.

Uticaji u konstrukciji traže se za četiri slučaja opterećenja, data preko četiri spektralne krive. Prilikom određivanja uticaja, za svaki slučaj opterećenja posebno, isti spektar pseudoubzranja deluje u pravcu osa 1 i 2 istovremeno.

Tavanice konstrukcije su krute betonske ploče. Obrtanje čvorova čelične konstrukcije nije sprečeno. Za proračun uticaja u konstrukciji, u radu je korišćen model zgrade sa krutim tavanicama - pseudo trodimenzionalni model, opisan u radu [2]. Mase konstrukcije su koncentrisane u težištima tavanica i vrednosti su date u tabeli 1.

where l_k is the length of the rigid zone in a joint, while l is the length of a beam element. The effects in this diagram are normalized by dividing their values with the corresponding values obtained for the structure without eccentricity. The normalized effect is given as

where u_{K_e} is considered effect for the coefficient of eccentricity K_e , while $u_{K_e=0}$ is the same effect for $K_e=0$.

The effects calculated in the parametric analysis are the extreme effects in the structure, determined according to the procedure outlined in section 5. Normalized values of extreme effects are obtained according to expressions (47), or (49).

As an example structure, used in the parametric analysis, a non-symmetric framed building with three towers of different number of stories is considered. The main tower has ten stories, while the other two towers have four and six stories, (Fig. 5). The bay distance of columns in X and Y directions is 8m, and the story height is 4m. Cross-sectional properties are, for beams: area $F=0.306m^2$, moments of inertia $I = 0.002569 m^4$ and for columns: area $F=0.1224m^2$ moments of inertia in both directions $I = 0.001798 m^4$. Young's modulus of elasticity of material is $E = 2.1 \times 10^8 kNm^{-2}$ (steel). Eccentricity and rigidity of joint connections is considered only at beam-to-column connections.

The structure is analyzed for loadings that are defined as given curves of pseudo-acceleration (Fig. 6a): the curve S_{Ec1} according to [1], with parameters: $\beta=1.2ms^{-2}$, soil type B (middle soil), behavior factor $q=1$, $\xi=0\%$; curve S_{Ec2} according to [1], with parameters: $\beta=1.2ms^{-2}$, soil type B (middle soil), behavior factor $q=1$, $\xi=5\%$; and curve S_{Yu} according to [4], with parameters: soil type II, category of structure II, structural type 1 and the seismic zone IX. Since the results of parametric analysis are presented by the normalized diagrams $K_k \cdot N_{k,ut}$ and $K_e \cdot N_{e,ut}$ i.e. only normalized effects are of interest, it is possible to use the normalized values of the pseudo-acceleration spectrums (Fig. 6b). The normalization is performed with respect to the maximum value of pseudo-acceleration for each curve separately. Besides the normalized curves of pseudo-acceleration spectrums S_{Ec1} , S_{Ec2} and S_{Yu} the unit pseudo-acceleration spectrum S_C is introduced too, in order to eliminate the influence of the shape of the spectral curve in the calculation and to obtain the limit values of normalized effects in the structure with the flexible and eccentric joint connections.

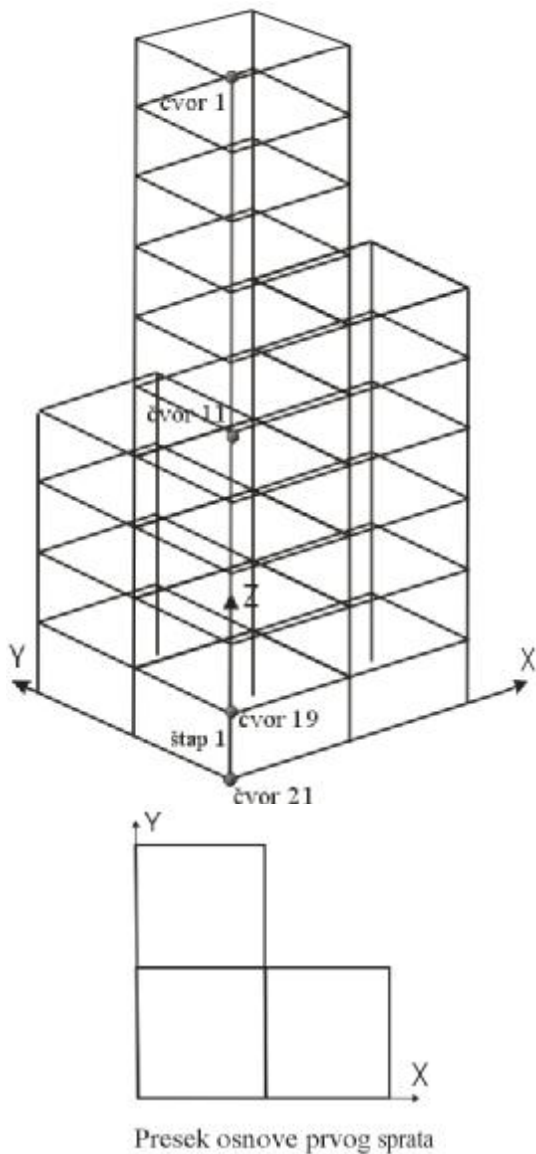
Effects in the structure are determined for the four loading cases, given by four spectral curves. Determination of extreme effects was done for simultaneous pseudo-acceleration spectrum in both axes 1 and 2, for each loading case.

Floor slabs of the structure are rigid concrete plates. Rotations of joints of the steel part of the structure is not prohibited. Numerical model of a building was assumed

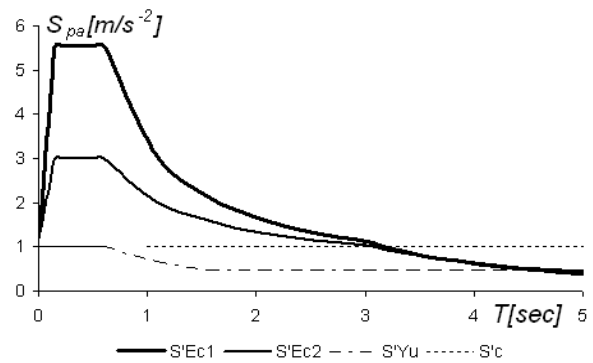
as the pseudo tridimensional model with rigid floors, as described in [2]. The mass of the structure is concentrated in the centers of mass of each slab and is given in the Table 1.

Tabela 1: Mase po spratovima
Table 1: Floor masses

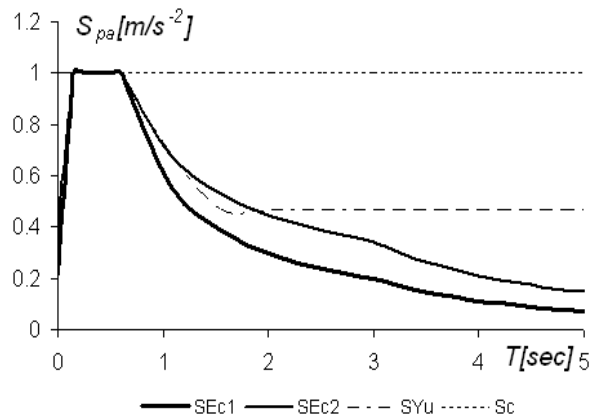
Tavanica Floor	$m_x \left[\frac{kN \text{ sec}^2}{m} \right]$	$m_y \left[\frac{kN \text{ sec}^2}{m} \right]$	$m_{jz} [kNm \text{ sec}^2]$
1- 4	120	120	7263
5- 6	80	80	2133
7-10	40	40	426



Slika 5 Izgled zgrade i osnove sa oznakama čvorova u kojima su traženi uticaji
Fig. 5 3D view and plan of a building with node numbers where the effects are determined



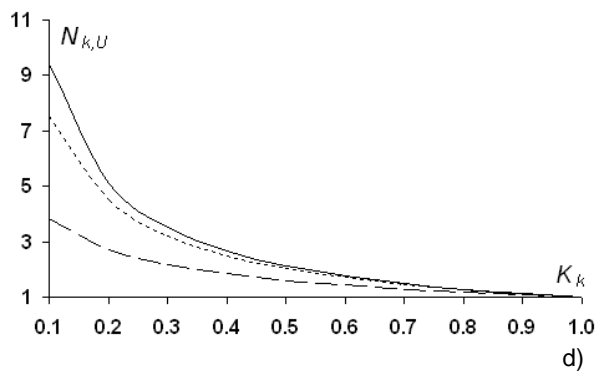
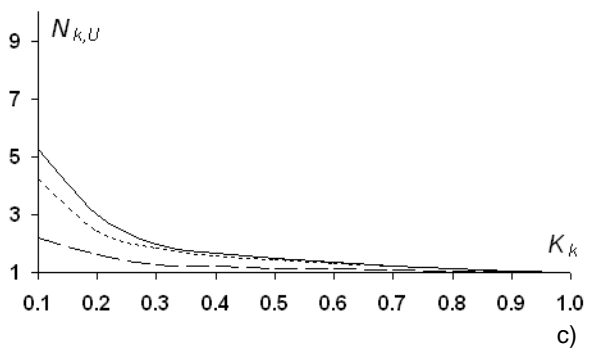
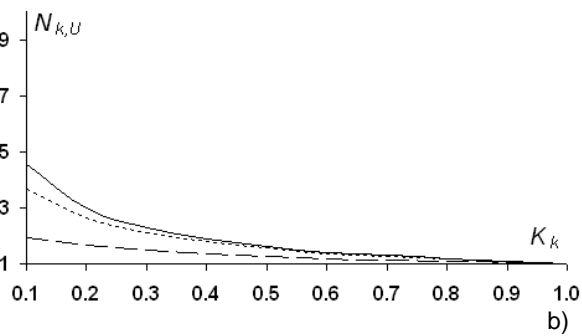
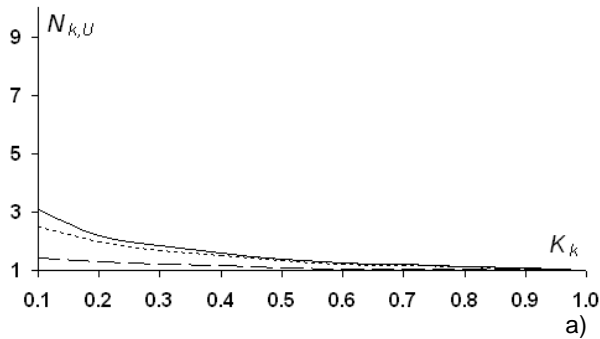
a)



b)

Slika 6 a) Krive spektra pseudoubrzanja, b) Normalizovane krive spektra pseudoubrzanja
Fig. 6 a) Pseudo-acceleration spectrum curves b) Normalized pseudo-acceleration spectrum curves

Na slici 7 prikazan je uticaj promene koeficijenta krutosti na normalizovana ekstremna pomeranja čvorova 1, 11 i 19 u pravcu ose X. Normalizovana ekstremna pomeranja rastu sa opadanjem koeficijenta krutosti. Za isti

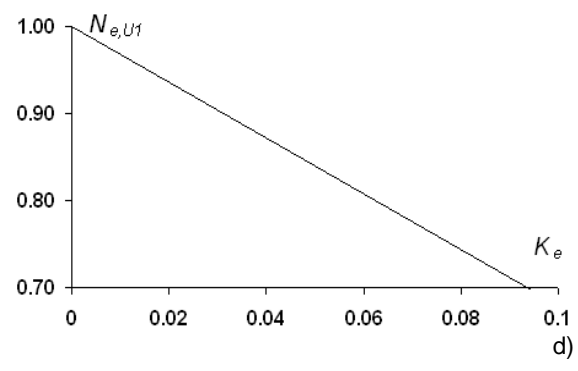
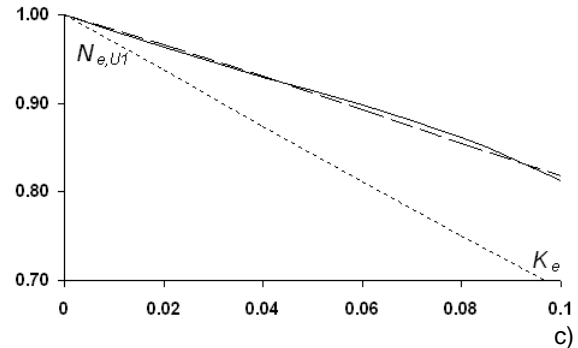
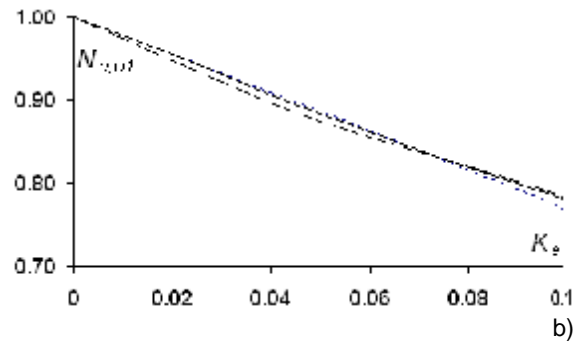
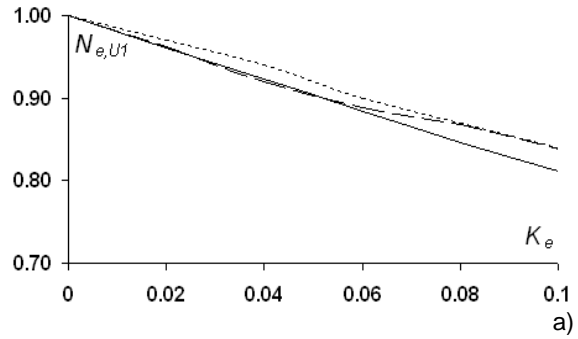


— U1 - - - - U11 - - - - U19

Slika 7 Uticaj krutosti veze na normalizovane ekstremne vrednosti pomeranja čvorova u pravcu X usled a) S_{Ec1} b) S_{Ec2} c) S_{Yu} d) S_C

Fig. 7 Influence of the joint rigidity upon the normalized extreme displacements in X direction due to: a) S_{Ec1} b) S_{Ec2} c) S_{Yu} d) S_C

Fig. 7 is presenting the influence of the change of the coefficient of rigidity upon the normalized extreme displacements of nodes 1, 11 and 19 in direction of the global X axis. The normalized extreme displacements are



- - - - Kk=0.1 - - - - Kk=0.5 — Kk=1.0

Slika 8 Uticaj ekscentriciteta veze na normalizovane ekstremne vrednosti pomeranja čvorova 1 usled a) S_{Ec1} b) S_{Ec2} c) S_{Yu} d) S_C

Fig. 8 Influence of the joint eccentricity upon the normalized extreme displacements of node 1 due to: a) S_{Ec1} b) S_{Ec2} c) S_{Yu} d) S_C

koeficijent krutosti, normalizovano ekstremno pome-
ranje se uvećava sa uvećanjem sprata. Normalizovana
ekstremna pomeranja, data na slikama 7a-c, ne prelaze
odgovarajuće granične vrednosti pomeranja date na slici
7d.

Na slici 8 prikazan je uticaj promene koeficijenta
ekscentričnosti, a za tri vrednosti koeficijenta krutosti
 $K_k=0.1, 0.5, 1.0$, na normalizovano ekstremno pome-
ranja čvora 1 u pravcu ose X. Sa slike se vidi, da što je
veći koeficijent ekscentričnosti, za bilo koji koeficijent
krutosti, normalizovano ekstremno pomeranje se
smanjuje približno linearno. Za istu vrednost koeficijenta
ekscentričnosti, a za različite koeficijente krutosti,
normalizovana ekstremna pomeranja su približno ista.

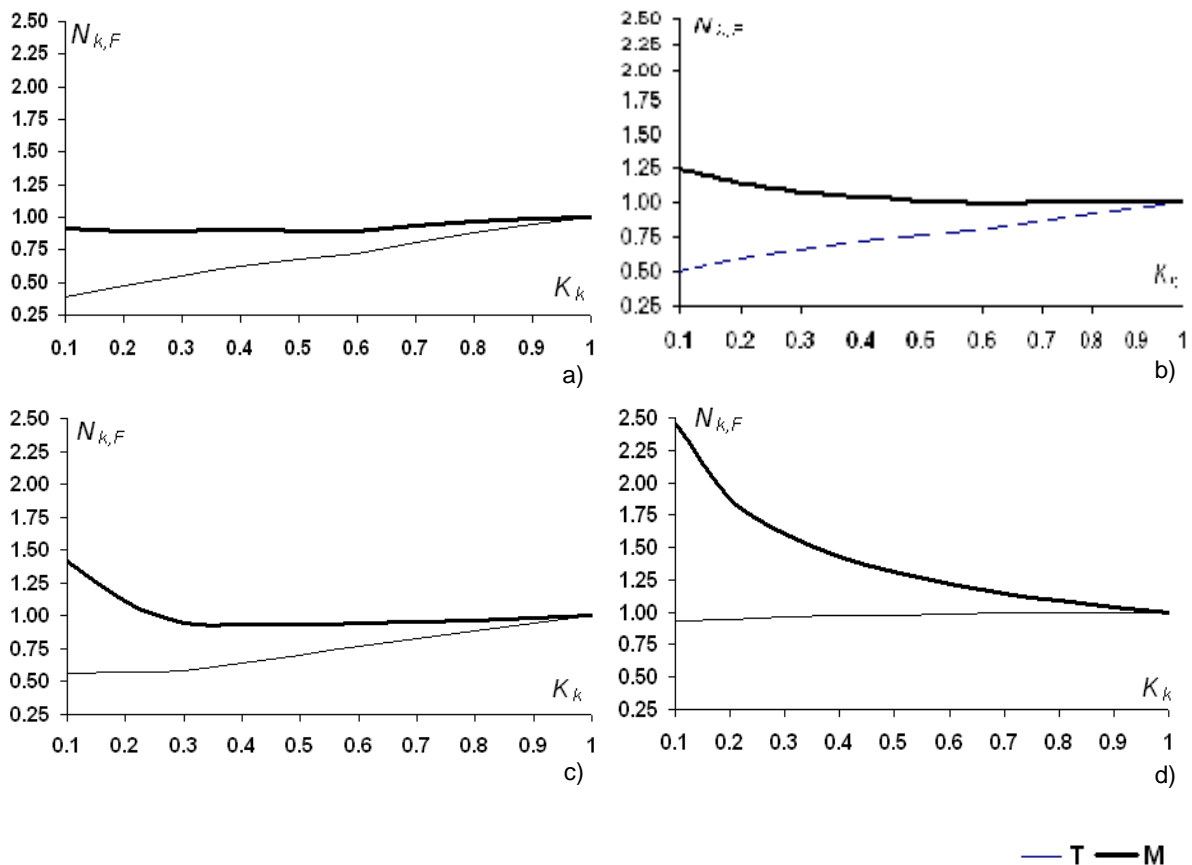
Normalizovana ekstremna pomeranja, data na slika-
ma 8a-c, ne prelaze odgovarajuće granične vrednosti
date slici 8d.

Na slici 9 prikazan je uticaj promene koeficijenta
krutosti na normalizovane ekstremne vrednosti prese-
čnih sila u oslonačkom čvoru 21. Transverzalna sila T je
data u pravcu globalne ose Y, a momenat savijanja M je
dat oko globalne ose X. Na dijagramima se vidi, da sa
smanjenjem koeficijenta krutosti normalizovane ekstre-
mne transverzalne sile ravnomerno opadaju. Normalizo-
vani ekstremni momenti savijanja, sa smanjenjem koefi-
cijenta krutosti, i u zavisnosti od primenjenog spektra
psudoubrzanja, mogu da opadaju pa da rastu (slika 9c).

increasing with decrease of the coefficient of rigidity. For
a given coefficient of rigidity normalized extreme
displacement is increasing with increase of floor level.
Normalized extreme displacements, given in Figs. 7a-c,
do not overcome the limit values of displacements given
in Fig. 7d.

Fig. 8 is presenting the influence of the change of the
coefficient of eccentricity, for the three values of the
coefficient of rigidity $K_k=0.1, 0.5, 1.0$, upon the
normalized extreme displacement of node 1 in direction
of the axis X. It may be seen from the figure that with
increase of the coefficient of eccentricity, for any
coefficient of rigidity, normalized extreme displacement is
decreasing approximately linearly. For the same value of
the coefficient of eccentricity, normalized extreme
displacements are approximately the same.

Fig. 9 is presenting the influence of the change of the
coefficient of rigidity upon the values of the cross-
sectional forces at the support joint 21. Transverse force
T is in direction of the global axis Y, while the bending
moment M is about the global axis X. From the given
diagrams, it may be seen that the normalized extreme
transverse forces are uniformly decreasing with
decrease of the coefficient of rigidity. Normalized exte-
reme bending moments, with decrease of the coefficient of
rigidity and depending on the applied spectrum of
pseudo-acceleration, may decrease and then increase



Slika 9 Uticaj krutosti veze na normalizovane ekstremne vrednosti presečnih sila u čvoru 21 usled a) S_{Ec1} b) S_{Ec2} c) S_{Yu} d) S_C

Fig. 9 Influence of joint rigidity upon the normalized extreme values of cross-sectional forces in joint 21 due to a) S_{Ec1} b) S_{Ec2} c) S_{Yu} d) S_C

Normalizovane ekstremne presečne sile, date na slikama 9a-c, ne prelaze odgovarajuće granične vrednosti date slici 9d.

Iz dijagrama na slikama 7 i 9 može da se vidi da promena krutosti veze ima dosta većeg uticaja na pomeranja nego na presečne sile.

7 ZAKLJUČAK

Matrica krutosti za gredne elemente sa polukrutim i ekscentričnim vezama, kao i postupci modalne i spektralne analize, prikazani su u radu i implementirani su u razvijenom programu ELAN, napisanom u jeziku C++. Program je namenjen za linearnu statičku i dinamičku analizu prostornih ramovskih konstrukcija, a samim tim i za analizu prostornih i nesimetričnih zgrada, uključujući i seizmičku analizu datu preko spektralnog opterećenja.

U cilju ilustracije numeričkog postupka razmatrana je nesimetrična zgrada, gde glavna kula zgrade ima deset spratova, dok sporedne kule imaju četiri, odnosno šest spratova. Za analizu uticaja u zgradi, korišćen je model zgrade sa krutim tavanicama – pseudo trodimenzionalni model. Uticaj polukrute i ekscentrične veze u proračun je uveden preko korektivne matrice. Primenom korektivne matrice modifikovana je konvencionalna matrica krutosti elementa sa krutim i centričnim vezama.

Analiziran je uticaj ekscentriciteta i krutosti veza na ekstremne vrednosti uticaja (pomeranja i presečne sile) usled opterećenja zgrade spektralnim opterećenjem.

Na osnovu analize dobijenih rezultata, može da se zaključi da: promena koeficijenta krutosti veze ima dosta većeg uticaja na normalizovana ekstremna pomeranja nego na normalizovane ekstremne presečne sile; sa smanjenjem koeficijenta krutosti: normalizovana ekstremna pomeranja se povećavaju, normalizovana ekstremna transverzalna sila u osloncu ravnomerno opada, a normalizovani ekstremni momenat savijanja u osloncu može na jednom delu dijagrama da opada a zatim da raste u zavisnosti od primenjenog opterećenja; sa povećanjem koeficijenta ekscentričnosti, za bilo koji koeficijent krutosti, normalizovana ekstremna pomeranja linearno opadaju.

(Fig. 9c). Normalized extreme cross-sectional forces, given in Figs. 9a-c, do not overpass the corresponding limit values given in Fig. 9d.

From diagrams given in Figs. 7 and 9 it may be concluded that the change of joint rigidity has substantially greater influence upon displacements than upon the cross-sectional forces.

7 CONCLUSION

The stiffness matrix for beam elements with semi-rigid and eccentric connections, modal and spectral earthquake analyses, are presented in the paper, and also implemented in the computer code called ELAN, see [2], which is developed in C++. The program is devoted to linear static and dynamic analysis of spatial frames, therefore also to 3D and non-symmetric buildings, including also seismic analysis defined by spectral loading.

As an illustration of the numerical procedure, a non-symmetric framed building is considered. The building consists of three parts, or towers, of unequal heights: the main one is 10 stories high, while the other two are 6 and 4 stories. The building is modelled as a structure with rigid floors - shear building pseudo tridimensional model. The influence of semi-rigid and eccentric connections is introduced by the corresponding corrective matrix which is modifying the classical stiffness matrix for beam elements with rigid and centric connections.

The influence of eccentricity and rigidity of joint connections upon the extreme values of effects (displacements and cross-sectional forces) is analyzed, due to seismic loading of a building defined by the spectral curves.

Based upon the analysis of obtained results, it may be concluded that the change of coefficient of rigidity in joints has much larger influence upon the normalized extreme displacements than upon the normalized extreme cross-sectional forces. When the coefficient of joint rigidity is decreased, normalized extreme displacements are increasing, while the normalized extreme transverse force (at considered support joint) is uniformly decreasing. Also, the normalized extreme bending moment (at support joint) is partially decreasing and also increasing, depending on applied loading. Finally, when the coefficient of joint eccentricity is increasing, for any coefficient of joint rigidity, the normalized extreme displacements are linearly decreasing.

8 LITERATURA REFERENCES

- [1] Eurocode 8 (EC8/ EN 1998 Design for earthquake resistance)
- [2] Gopčević Š.: Dinamička analiza skeletnih zgrada sa polukrutim vezama, magistarski rad, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, 2002
- [3] Kalman T., Sigmund V.: „Superpozicija modalnih odgovora spektralne analize“, Tehnički vjesnik, Osijek, Hrvatska, br.14, 2007, str.17-24
- [4] Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju objekata visokogradnje u seizmičkim područjima, Službeni list SFRJ br. 31/8, 49/82, 29/83
- [5] Suarez E.L., Singh P.M., Matheus E.E.: „Seismic Response of Structure Frameworks with Flexible Connections“, Computer&Structures, Vol. 58, No.1, 1996, pp.27-41
- [6] Marković Z., Čorić B.: „Matrična analiza ravnih okvirnih nosača sa polukrutim vezama“, Izgradnja 50, 1996, str. 461-468
- [7] Marković Z.: Analiza ponašanja polukrutih veza u čeličnim konstrukcijama, magistarski rad, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, 1995
- [8] Wilson L. E.: Button R.M., „Three Dimensional Dynamic Analysis for Multicomponent Earthquake Spectra“, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol 10, 1982, pp.471-476
- [9] Lađinović Đ.: „Savremene metode seizmičke analize konstrukcija zgrada“, Materijali i konstrukcije, 51(2), 2008, str.25-39
- [10] Dražić J.: „Konceptualno projektovanje aseizmičke konstrukcije – vrednovanje praktičnih rešenja“, Materijali i konstrukcije, 52(3-4), 2009, str. 21-34
- [11] Žugić Lj., Brčić S.: „Vremenski odgovor nesimetrične zgrade u zavisnosti od dominantnog pravca djelovanja zemljotresa“, Materijali i konstrukcije, 53(1), 2010, str. 14-32
- [12] Tomažević M.: „Uvođenje evrokodova i proračun seizmičke otpornosti zidanih konstrukcija“, Materijali i konstrukcije, 51(2), 2008, str. 3-24

REZIME

SPEKTRALNA MODALNA ANALIZA ZGRADA SA POLUKRUTIM I EKSCENTRIČNIM VEZAMA

Špiro GOPČEVIĆ
Stanko BRČIĆ
Ljiljana ŽUGIĆ

U radu su analizirane ekstremne vrednosti uticaja u nesimetričnoj čeličnoj zgradi sa polukrutim i ekscentričnim vezama usled opterećenja datog preko multikomponentnog spektra pseudoubrzanja. Polukruta veza krajeva štapa modelirana je pomoću rotacionih opruga, na krajevima štapa, koje imaju linearnu vezu moment-rotacija. Ekscentričnost veze predstavljena je kratkim beskonačno krutim elementima na krajevima štapa. Uticaj polukrute i ekscentrične veze u proračun je uveden preko korektivne matrice. Primenom korektivne matrice modifikovana je konvencionalna matrica krutosti elementa sa krutim i centričnim vezama.

Kao dinamičko opterećenje konstrukcije razmatrano je opterećenje konstrukcije dato preko multikomponentnog spektra pseudoubrzanja. Primenom metode spektralne modalne analize određen je kritični ugao pod kojim deluje opterećenje, dato preko multikomponentnog spektra pseudoubrzanja za svaki uticaj, i za taj ugao su određene ekstremne vrednosti uticaja.

U cilju numeričke realizacije ovoga problema, prikazane metode ugrađene su u razvijeni kompjuterski program, pomoću kojega je sprovedena parametarska analiza ekstremnih uticaja i rezultati analize su dati u radu.

Ključne reči: linearna dinamička analiza, spektralna analiza, modalna analiza, polukrute veze, ekscentrične veze

SUMMARY

SPECTRAL MODAL ANALYSIS OF BUILDING WIDTH SEMI-RIGID AND ECCENTRIC CONNECTIONS

Spiro GOPCEVIC
Stanko BRCIC
Ljiljana ZUGIC

The paper is analyzing extreme values of effects (displacements and cross-sectional forces) in the non-symmetrical 3D steel frame buildings with semi-rigid and eccentric joint connections, due to seismic loading given by the multi-component pseudo-acceleration spectrum. Semi-rigid connections at beam ends are modeled by the rotational springs at beam ends, which are posing the linear moment-rotation relationship. Eccentricity of joint connections is represented by the short infinitely rigid links at beam ends. The influence of semi-rigid and eccentric connection is introduced into analysis by the corrective matrix. The corrective matrix is modifying the conventional stiffness matrix of beam elements with rigid and centric joint connections.

Dynamic seismic loading of the structure was considered as the corresponding multi-component pseudo-acceleration spectrums. Applying the spectral modal analysis the critical angle of loading direction is determined, for each case of multi-component pseudo-acceleration spectrum, and for obtained critical angle the corresponding extreme values of influences are determined.

In order to perform numerical analyses, all presented methods are implemented in developed computer code, which is used for conducted parametric analyses of the influence of rigidity and eccentricity of joint connections upon the extreme effects (displacements and cross-sectional forces). Obtained results and conclusions are given in the paper.

Key words: linear dynamic analysis, spectral analysis, modal analysis, semi rigid connections, eccentric connections

KARAKTERISTIKE PORTLAND CEMENTA SA DODATKOM METAKAOLINA DOBIJENOG KALCINACIJOM DOMAĆE KAOLINSKE GLINE

CHARACTERISTICS OF PORTLAND CEMENT WITH ADDITION OF METAKAOLIN OBTAINED BY CALCINATION OF DOMESTIC KAOLIN CLAY

Aleksandra MITROVIĆ
Dragica JEVTIĆ
Ljiljana MILIČIĆ
Biljana ILIĆ

ORIGINALNI NAUČNI RAD
UDK: 666.942.5.017 = 861

1 UVOD

Cement je jedan od najznačajanijih građevinskih materijala, čija godišnja proizvodnja u svetu prelazi 2.7 milijardi tona. Uprkos uspešnosti koju ima, industrija cementa je suočena sa izazovima u pogledu povećanja trajnosti objekata i poboljšanja njihovih performansi, uz istovremeno povećanje održivosti proizvodnje.

Proizvodnja cementa odvija se u nekoliko faza tehnološkog procesa:

- priprema sirovine (usitnjavanje, mlevenje, sušenje, homogenizacija),
- pečenje klinkera,
- hlađenje klinkera,
- mlevenje i mešanje cementa,
- skladištenje i pakovanje cementa.

Sirovina za proizvodnju portland cementa uglavnom se sastoji od krečnjaka, laporca i/ili gline, uz dodatak komponenata za korekciju sastava klinkera (kvarcni pesak, ruda gvožđa, boksit i dr.).

Nakon procesa usitnjavanja, mlevenja, sušenja i homogenizacije mešavine sirovina, dobija se sirovinsko brašno za pečenje klinkera. Da bi se proizveo klinker, sirovinsko brašno se zagreva na 1450°C.

U temperaturnom intervalu od 100°C do 600°C odvijaju se reakcije dehidratacije sirovinskih komponenti, uz isparavanje vlage hemijski vezane u mineralima gline. Između 600°C i 1100°C odvijaju se reakcije dekarbonizacije:

Dr Aleksandra Mitrović, Institut za ispitivanje materijala,
Bulevar vojvode Mišića 43, Beograd,
aleksandra.mitrovic@institutims.rs
Prof. dr Dragica Jevtić, Građevinski fakultet Univerziteta u
Beogradu, dragica@imk.grf.bg.ac.rs

1 INTRODUCTION

Cement is one of the most important building materials which annual worldwide production exceeding 2.7 billion tons. Despite the success it has, the cement industry is facing challenges in terms of increasing durability of structures and improving their performance and sustainable production.

Cement production is carried out in several stages of technological process:

Preparation of raw materials (crushing, grinding, drying, homogenization),

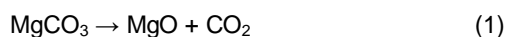
- Burning clinker,
- Cooling clinker,
- Grinding and mixing cement,
- Storage and packing cement.

Raw materials usually used for the production of Portland cement are limestone, marl and/or clay, with the addition of components to correct the composition of clinker (quartz sand, iron ore, bauxite, etc.).

Raw meal for burning clinker is obtained, after the process of crushing, grinding, drying and homogenizing a mixture of raw materials. In order to produce clinker, raw meal is heated to 1450°C.

During the heating clinker, in the temperature range from 100°C to 600°C, dehydration of raw materials and the evaporation of moisture from clay minerals occur. Between 600°C and 1100°C materials proceeds through the decarbonification:

Ljiljana Miličić, dipl. hem. Institut za ispitivanje materijala,
Beograd, ljiljana.milicic@institutims.rs
Mr Biljana Ilić, Institut za ispitivanje materijala, Beograd,
biljana.ilic@institutims.rs



U temperaturnom intervalu od 1100°C do 1300°C dolazi do egzotermnih reakcija, a u intervalu od 1300°C do 1450°C (zona sinterovanja) dolazi do vezivanja slobodnog CaO sa SiO₂, Al₂O₃ i Fe₂O₃, gde se, osim reakcija u čvrstoj fazi, odvijaju i heterogene reakcije:



Kvalitet klinkera zavisi od sadržaja osnovnih minerala, a na proces stvaranja minerala klinkera utiču i minorne komponente (MgO, SiO₃, K₂O, Na₂O i dr.), naročito kod nastajanja nekih polimorfni oblika glavnih minerala klinkera. Konačni fazni sastav klinkera zavisi od postupka hlađenja, koji započinje u izlaznoj zoni peći i nastavlja se u hladnjaku klinkera, gde dolazi do ravnotežne ili nezavisne kristalizacije rastopa uz nastajanje staklaste faze.

Cement, kao konačni proizvod, je smeša klinkera, gipsa (regulatora vezivanja) i drugih primesa (dodataka) koje pri hidrataciji cementa ispoljavaju hidraulička svojstva. Takva smeša, u zadatom odnosu za svaku klasu cementa, melje se u cementnom mlinu na određenu finoću čestica.

1.1 Uticaj proizvodnje cementa na životnu sredinu

Približno 5% ukupne globalne emisije CO₂ potiče iz proizvodnje cementa. Emisija gasova je posledica sagorevanja goriva i hemijskih reakcija koje se odigravaju u pojedinim fazama procesa, prvenstveno u fazi pečenja klinkera (jedn. 1 i 2). Proizvodnja cementa spada u red industrijskih grana s najvećom specifičnom potrošnjom električne i toplotne energije po jedinici proizvoda.

U toku procesa proizvodnje cementa, oslobađa se oko 0.92 t CO₂ po toni proizvedenog klinkera. Ova emisija uglavnom potiče od dekarbonizacije krečnjaka (0.53 t) i korišćenja ugljeničnih goriva za grejanje (0.39 t). Srednja emisija CO₂ koja potiče od procesa mlevenja je reda veličine 0.1 t CO₂ po toni cementa i pretežno potiče od proizvodnje električne energije.

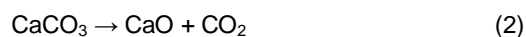
Na slici 1. prikazan je pojednostavljen proces proizvodnje cementa sa posebnim naglaskom na emisiju CO₂ [10].

Za smanjenje emisije CO₂ koja potiče iz proizvodnje cementa, u svetu su opšte prihvaćena dva pristupa: (1) smanjenje emisije CO₂ u procesu proizvodnje klinkera i (2) smanjenje sadržaja klinkera u cementu.

Zbog značaja koji u svetu ima cementna industrija, mnoge studije se bave procenama za budućnost, usmeravajući se uglavnom na potencijalno smanjenje emisije CO₂ i povećanje energetske efikasnosti prema očekivanim varijacijama u proizvodnji cementa.

Pored zahteva koji se nameću industriji cementa u pogledu zaštite životne sredine, ona kao i svi drugi industrijski sektori, teži povećanju ekonomičnosti koja se može postići:

- uštedom energije,
- korišćenjem jeftinijih sirovina pri proizvodnji klinkera,
- smanjenjem klinkera u cementu.



In the temperature range from 1100°C to 1300°C exothermic reactions occurs, while in the range from 1300°C to 1450°C (sintering zone) free CaO is binding with SiO₂, Al₂O₃ and Fe₂O₃, where, in addition to the solid phase reactions, heterogeneous reactions taking place:

Clinker quality depends on the content of primary (main) minerals. The process of formation clinker minerals is affected by content of minor components (MgO, SiO₃, K₂O, Na₂O, etc.), especially for appearance of some polymorphic shapes of main clinker minerals. The final phase composition of clinker depends on the cooling process, which begins at the exit zone of the furnace and continue to the clinker cooler, where reaches equilibrium or the independent crystallization of the melt suived, with appearance of glass phase.

Cement, as final product, is a mixture of clinker, gypsum (setting regulator) and other additives, which, during the cement hydration, exhibits hydraulic properties. Such a mixture, in the given relation to each class of cement, grinds in the mill to obtain appropriate fineness.

1.1 Influence of cement production on the environment

Approximately 5% of global CO₂ emissions come from cement production. Gas emission is the result of fuel combustion and chemical reactions that take place in different stages of the process, primarily in the clinker burning stage (eq. 1 and 2). Cement production is one of the leaders among the industrial sectors with highest consumption of electricity and thermal energy per unit of product.

During the process of cement manufacturing, around 0.92 t of CO₂ is released per tonne of clinker produced. This emission mainly comes from decarbonization of limestone (0.53 t), and the use of carbon fuels for heating (0.39 t). Average CO₂ emissions associate with milling processes are 0.1 t of CO₂ per tonne of cement and comes from production of electricity.

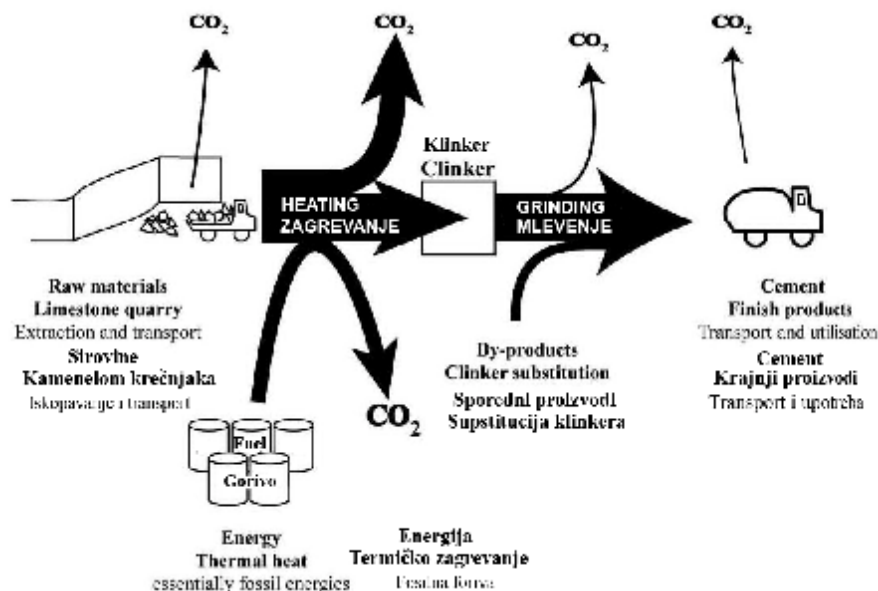
Fig. 1 shows the simplified process of cement production, with special emphases on CO₂ emissions [10].

To reduce CO₂ emissions, originated from the production of cement, in the world are generally accepted two approaches: (1) reducing CO₂ emissions in the production of clinker and (2) reduction content of the clinker in cement.

Owing to importance that worlds cement industry has, many studies dealing with estimates for the future, focusing mainly on the potential reduction in CO₂ emissions and increasing energy efficiency by the expected variations in the production of cement.

In addition to requirements imposed to the cement industry in terms of environmental protection, it tends, like all other industrial sectors, to increase cost-effectiveness, which may be obtained by:

- Saving energy,
- Using cheaper raw materials in the production of clinker,
- Reducing clinker in cement.



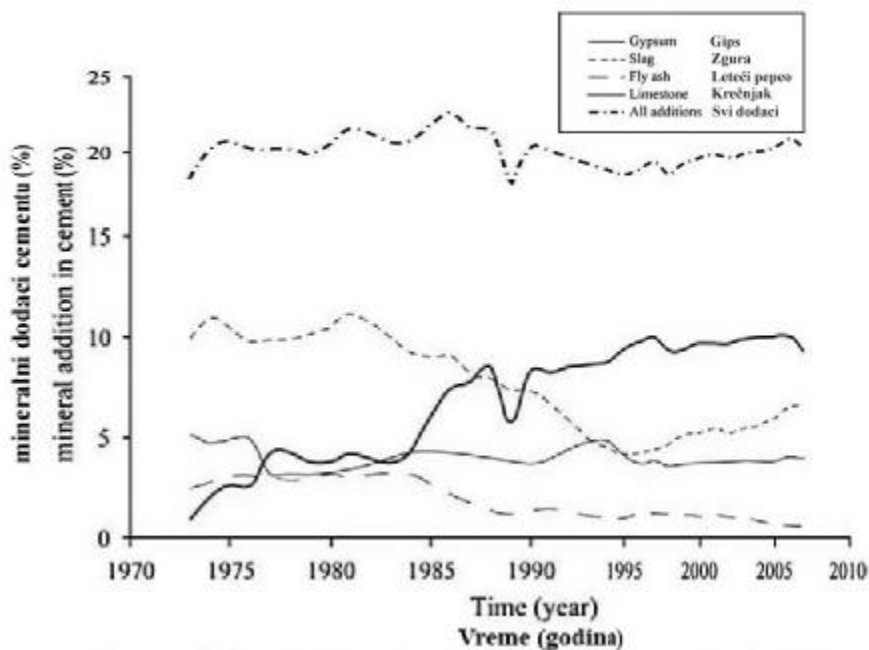
Slika 1. Pojednostavljen proces proizvodnje cementa, sa posebnim naglaskom na emisiju CO₂. Debljina strelica je proporcionalna količini materijala
 Figure 1 Simplified process of cement production, with special emphases on CO₂ emissions. The thickness of the arrows is proportional to the amount of material

1.2 Smanjenje udela klinkera u cementu

Poslednjih 20-30 godina, za parcijalnu zamenu klinkera u cementu koriste se industrijski nus-proizvodi leteći pepeo, granulisana zgura visoke peći i silikatna prašina. Pored njih primenjuju se i krečnjaci i prirodni pucolanai. Na slici 2. prikazana je procena zamenjenog klinkera mineralnim dodacima u periodu 1973. do 2007. godine [10].

1.2 Reduction the clinker in cement

In the last 20-30 years, for the partial replacements of clinker are used industrial by-products, such as fly ash, granulated blast furnace slag and silica fume. Beside them, natural pozzolanas and limestone are used. Figure 2. shows estimated replaced clinker with most common used mineral additions in the period 1973. to 2007. [10].



Slika 2. Procena zamene klinkera od 1973. do 2007.
 Figure 2 Estimates of replaced clinker from 1973. to 2007.

Korišćenje navedenih, tzv. konvencionalnih dodataka, ima ograničenja i zato se danas u svetu intenzivno istražuju mogućnosti korišćenja novih materijala čijom bi se primenom, pored smanjenja potrošnje energije i emisije gasova, postigla poboljšanja karakteristika cementa, maltera i betona kojima se dodaju, uz sniženje cene finalnog proizvoda. Jedan od mineralnih dodataka nove generacije, koji zadovoljava zahteve održivog razvoja i poboljšava svojstva cementa, maltera i betona, je metakaolin.

Pored toga, sa stanovišta kvaliteta mineralnog dodatka, metakaolin je konzistentan proizvod jer se proizvodi pri kontrolisanim uslovima u pogledu: hemijskog sastava, raspodele veličine čestica, pucolanske reaktivnosti i boje.

U Srbiji se godišnje proizvede približno 2.5 miliona tona portland cementa sa dodacima (granulisana zgura visoke peći, pepeo iz proizvodnje uglja, prirodni pucolani) - CEM II. Udeo dodataka u ovim cementima se kreće od 5-35 % težinskih i prvenstveno zavisi od zahteva tržišta za pojedinim vrstama cementa, a definisan je odgovarajućim standardima [9, 16]. Cement se u Srbiji proizvodi u tri cementare, pri čemu nijedna od cementara ne koristi metakaolin kao dodatak cementima, jer se metakaolin ne proizvodi u našoj zemlji.

1.3 Metakaolin, dopunski cementni materijal nove generacije

Od sredine 1990, visoko reaktivni metakaolin (HRM) se proizvodi u nekoliko fabrika širom sveta: AGS Mineraux - Francuska, ČLUZ a.s - Češka, BASF - USA, Advanced Cement Technologies, LLC – USA, Whitmund - Kanada, itd. HRM se konvencionalno proizvodi termičkom aktivacijom/kalcinacijom prethodno prečišćenih kaolinskih gline sa visokim sadržajem kaolinita, i njegova primena u betonima standardnih čvrstoća je ograničena zbog relativno visoke cene proizvodnje (500\$/t). Troškovi proizvodnje metakaolin se mogu znatno smanjiti kada se primeni postupak termičke aktivacije kaolinske gline sa nižim sadržajem kaolinita uz izostanak faze prečišćavanja polazne sirovine, čime je primena takvog dodatka opravdana čak i u cementima i betonima standardnih čvrstoća.

Supstitucijom dela klinkera u cementu ili dela cementa u betonskim mešavinama, postižu se značajne tehničke, ekološke i finansijske prednosti [15]. Tako se, zamenom portland cementa sa 8 - 20% (masenih) metakolina u betonu, postiže niz tehničkih prednosti:

- povećanje čvrstoće pri pritisku i pri savijanju,
- smanjenje propustljivosti (uključujući propustljivost hlorida),
- smanjenje eflorescenciju,
- povećanje otpornosti na dejstvo hemijskih agenasa,
- povećanje trajnosti,
- smanjenje alkalno-silikatne reaktivnosti (ASR),
- povećanje obradivosti betona i
- smanjenje ekspanzije zbog gušćeg pakovanja čestica.

Zbog nabrojanih tehničkih prednosti, materijali na bazi cementa sa dodatkom metakolina, imaju široku primenu za pripremu: betona visokih performansi, visoke

Using these, so called conventional additives, have limitations and that is why in the world today, intensively explore the possibility of using new materials which application would, in addition to reducing energy consumption and gas emission, improve the characteristics of cement, mortar and concrete, and reduce the price of the final product. One of a new generation of mineral additives, which meets the requirements of sustainable development and improving the properties of cement, mortar and concrete, is metakaolin.

Besides, from the standpoint of quality mineral additive, metakaolin is a consistent product, because it is produced in controlled conditions in terms of: chemical composition, particle size distribution, pozzolanic activity and color.

In Serbia, the annual production of composite Portland cement (CEM II) with blast furnace slag, coal ash and natural pozzolana is approximately 2.5 million tons. Content of additions in these cements range from 5 to 35 % by mass. It primarily depends on market demand for certain types of cement and it is defined by the appropriate standards [9, 16]. Cement is produced in Serbia in three cement plants, where none of metakaolin uses, because it is not produced in our country.

1.3 Metakaolin, supplementary cementitious material of new generation

Since mid-1990, a highly reactive metakaolin (HRM) has produced in several factories around the world: AGS Mineraux - France, ČLUZ a.s - Czech, BASF - USA, Advanced Cement Technologies, LLC – USA, Whitmund - Canada, etc. Conventionally HRM has produced by thermal activation/calcination of previously refined kaolin clay, with a high content of kaolinite, and thus application in the regular concrete is limited, because of the relatively high cost of production (500\$/t). Metakaolin production cost can be significantly reduced, by applying thermal activation process on kaolin clay with low kaolinite content, without raw materials refining, allowing use of such additive, even in the regular cement and concrete.

Substitution of clinker in cement or the cement in concrete mixes, leads to significant technical, environmental and financial benefits [15]. Thus, replacement of Portland cement with 8 - 20% by mass metakaolin in concrete, achieved a number of technical advantages:

- Increased compressive and flexural strengths,
- Reduced permeability,
- Reduced potential for efflorescence,
- Increased resistance to chemical attack,
- Increased durability,
- Reduced effects of alkali-silica reactivity (ASR),
- Enhanced workability of concrete, and
- Reduced shrinkage due to particle packing.

Because of the enumerated technical advantages of cement-based materials with addition of metakaolin, these materials are widely used for preparation: high-performance concrete, high strength and lightweight concrete, precast concrete, glass fiber reinforced

čvrstoće i lakih betona, prefabrikovanih betona, prednapregnutih betona sa staklenim vlaknima, umetničkih skulptura, i maltera.

Pri primeni metakaolina ekološke prednosti se u najvećoj meri manifestuju kroz:

- smanjenje potrošnje energije u procesu proizvodnje cementa: u procesu kalcinacije kaolinske gline troši se manje energije, jer se proces kalcinacije odvija na nižim temperaturama od onih koje treba primeniti za proizvodnju portland cementa (između 600-800 °C za metakaolin, 1450 °C za portland cement),

- izostanak emisije CO₂, jer na temperaturama kalcinacije ne dolazi do dekarbonizacije polaznih sirovina,

- smanjenje korišćenja prirodnih resursa, jer građevinski materijali koji sadrže metakaolin poseduju povećanu trajnost [14], kao i konstrukcije u koje su ugrađeni, i time smanjuju zahteve u pogledu održavanja,

- povećane trajnosti materijali, kao što su cement i beton sa dodatkom metakaolina, smanjuju probleme vezane za odlaganje čvrstog otpada.

1.4 Cilj istraživanja

U okviru projekta TR 19206, finansiranog od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj, u Institutu IMS razvijena je tehnologija za proizvodnju metakaolina iz domaće kaolinske gline.

Polazna glina Vrbica klasifikuje se u kategoriju sirovina visokog kvaliteta, jer je sadržaj kaolinita oko 80% i gubitak žarenjem 12.30%.

Osnovne karakteristike proizvedenog metakaolina su: zbir oksida $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 \geq 94,68\%$, pucolanska aktivnost određena prema Chapelle metodi 0.76 g Ca(OH)₂/g MK, i srednji prečnik čestica $d_{50} = 5.236 \mu m$. Karakteristike proizvedenog metakaolina upoređene su sa tipičnim karakteristikama HRM ($SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 \geq 90\%$, srednji prečnik čestica $d_{50} = 5 \mu m$, specifična masa 2.5 g/cm, bela boja) [13], na osnovu kojih se proizvedeni metakaolin može svrstati u kategoriju visoko reaktivnog metakaolina.

U istraživanjima vezanim za primenu dodataka cementu neophodno je ispitati uticaj dodatka na fizičko-mehaničke karakteristike. U ovom radu prikazani su rezultati ispitivanja fizičko-mehaničkih karakteristika portland cementa sa dodatkom 5-20% proizvedenog metakaolina.

2 EKSPERIMENTALNI DEO

2.1 Polazne sirovine

Za pripremu portland cementa sa dodatkom metakaolina korišćeni su Portland cement (CEM I 42,5R), proizvođača Lafarge BFC iz Beočina i metakaolin, dobijen termičkom aktivacijom/kalcinacijom kaolinske gline Vrbica.

Hemijski sastav i fizičke karakteristike polaznih sirovina (cementa i metakaolina) prikazane su u tabelama 1. i 2.

concrete, art sculptures, and plaster.

In applying metakaolin, environmental benefits are largely manifested through:

- Reduction of energy consumption in cement production process: the process of calcination kaolin clay uses less energy, because calcination process takes place at lower temperatures than those that should be applied for the process for production for Portland cement (between 600-800 °C for metakaolin, 1450 °C for Portland cement),

- Absence of CO₂ emission, because the calcination temperature are low to affect decarbonization of raw materials,

- Reduce the use of natural resources, because building materials with metakaolin has increased durability [14], as well as structures in which they are installed, thereby reducing the requirements in terms of maintenance,

- Increased durability of materials such as cement and concrete with the addition of metakaolin, reduce the problems associated with disposal of solid waste.

1.4 The aim of the research

The result of project TR 19206, funded by the Ministry for Science and Technological Development, is technology for obtaining metakaolin from domestic kaolin clay.

The starting clay Vrbica classifies into the category of high-quality raw materials, with content of kaolinite about 80% and loss of ignition 12.30.

The main characteristics of the produced metakaolin are: the sum of oxides $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 \geq 94,68\%$, pozzolanic activity (Chapelle method) 0.76 g Ca(OH)₂/g MK, and medium particle diameter $d_{50} = 5.236 \mu m$. Characteristics of the produced metakaolin are compared with typical characteristics of HRM ($SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 \geq 90\%$, medium particle diameter $d_{50} = 5 \mu m$, specific density 2.5, and white color) [13]. According obtained characteristics, produced metakaolin may classify into the category of high reactive metakaolin.

In researches related to the application of cement additives is necessary to examine the influence of the addition to the physical and mechanical characteristics. This paper presents the results of the physical and mechanical characteristics of Portland cement with addition of 5-20% produced metakaolin.

2 EXPERIMENTAL

2.1. Starting materials

Portland cement (CEM I 42,5R) of the producer Lafarge BFC and metakaolin, obtained by thermal activation/calcination of kaolin clay Vrbica, were used for the preparation of the samples.

Chemical composition and physical properties of the starting materials (cement and metakaolin) are shown in Table 1. and Table 2.

Tabela 1. Hemijski sastav i fizičke karakteristike cementa
Table 1 Chemical composition and physical properties of the cement

Hemijski sastav (% m/m) Chemical composition (% by mass)			
SiO ₂	20,36	Gubitak žarenjem Loss of ignition	3,00
Al ₂ O ₃	5,83	Nerastvorni ostatak u HCl/Na ₂ CO ₃ Insoluble residue in HCl/Na ₂ CO ₃	1,11
Fe ₂ O ₃	2,96	Nerastvorni ostatak u HCl/KOH Insoluble residue in HCl/KOH	0,62
CaO	62,36	CO ₂	1,04
MgO	1,32	Slobodan CaO Free CaO	0,43
SO ₃	2,80	Zbir: Sum:	99,70
Na ₂ O	0,15	Fizičke karakteristike Physical properties	
K ₂ O	0,79	R (%), ostatak na situ 0,09 mm R on sieve 0.09 mm (%)	0,3
MnO	0,127	S _p (cm ² /g)	4430
Cl ⁻	0,007	γ _s (g/cm ³)	3,10

Tabela 2. Hemijski sastav i fizičke karakteristike metakaolina
Table 2 Chemical composition and physical properties of the metakaolin

Hemijski sastav (%, m/m) Chemical composition (% by mass)		Fizičke karakteristike Physical properties	
SiO ₂	55,08	R (%) ostatak na situ 0,43 mm R(%) on sieve 0,43 mm	45
Al ₂ O ₃	34,50		
Fe ₂ O ₃	5,10		
CaO	0,67	S _p (Blaine), (m ² /g)	0.88
MgO	1,20	γ _s (g/cm ³)	2.61
Na ₂ O	0,29	Pucolanska aktivnost (Chapelle), (g Ca(OH) ₂ / g MK) Pozzolanic activity (Chapelle) (g Ca(OH) ₂ / g MK)	0,76
K ₂ O	1,24		
Gubitak žarenjem Loss of ignition	1,73		
Zbir: Sum:	99,45	d ₅₀ srednji prečnik čestica, (μm) d ₅₀ mean particle diameter, (μm)	5,236

2.2 Primjenjene eksperimentalne metode

Hemijski sastav portland cementa određen je u skladu sa standardnim metodama [19], dok je hemijski sastav metakaolina određen klasičnom silikatnom analizom.

Fizičke karakteristike cemenata, kao što su standardna konzistencija, vreme vezivanja, finoća mliva, zapreminska masa i specifična površina su određene prema standardima [20, 21]. Mehaničke karakteristike cemenata određene su u skladu sa standardnim metodama [18], a linearne deformacije prema standardu [17].

2.2 Applied experimental methods

The chemical composition of Portland cement was determined by standard methods [19], while the chemical composition of metakaolin was determined by silicate analysis.

Physical properties of cement, such as standard consistence, setting time, fineness, specific gravity and specific surface were determined according to the standards [20, 21]. Mechanical characteristics of the cement were determined according to the standards [18] and shrinkage of the mortar – linear deformations according to standard [17].

Pucolanska aktivnost metakaolina određena je Chapelle metodom [12]. Raspodele veličine čestica metakaolina određena je laser granulometrijskom metodom.

2.3 Priprema cementa sa dodatkom metakaolina

U cilju određivanja karakteristika portland-cement sa dodatkom metakaolina pripremljeni su uzorci cementa sa dodatkom 5, 10, 15 i 20 % (m/m) metakaolina.

Za ispitivanje čvrstoća pri savijanju i pri pritisku malterne mešavine su pripremljene prema standardu [18], vodo-cementni faktor (v/c) 0,5; standardni pesak (odnos vezivo : pesak=1 : 3).

3 REZULTATI I DISKUSIJA

Utjecaj dodatka 5, 10, 15 i 20% metakaolina portland cementu i karakteristike portland cementa određeni su kroz ispitivanje vremena vezivanja, čvrstoće pri savijanju, čvrstoće pri pritisku i skupljanja maltera, u svemu prema [17], [18] i [20].

3.1 Vreme vezivanja

Utjecaj dodatka metakaolina na vreme vezivanja kompozita portland cement - metakaolin prikazan je na slici 3.

Pozzolanic activity was determined by Chapelle method [12].

Particle size distribution of metakaolin was determined by laser granulometry.

2.3 Preparation of the cement with addition of metakaolin

In order to determine the characteristics of Portland cement with the addition of metakaolin, cement samples were prepared with the addition of 5, 10, 15 and 20% by mass metakaolin.

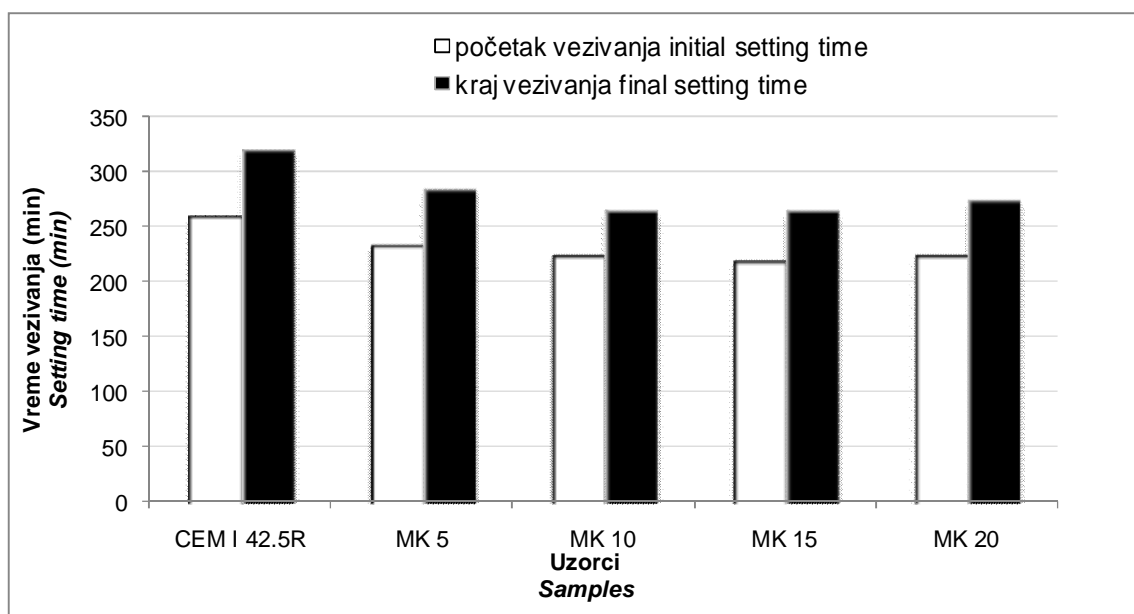
Mortar mixes, for the test of the flexural and compressive strengths, were prepared according to standard [18], with water-cement ratio (w/c) 0,5 and the ratio of binder : sand=1 : 3.

3 RESULTS AND DISCUSSION

The influence of addition 5, 10, 15 i 20% by mass metakaolin to the Portland cement were determined through examination of setting time, flexural and compressive strengths and shrinkage of the mortars, according [17], [18] and [20].

3.1 Setting time

The influence of the metakaolin on setting time of composites Portland cement - metakaolin is shown in Fig. 3.



Slika 3. Uticaj metakaolina na vreme vezivanja kompozita portland cement – metakaolin
Figure 3 Influence of metakaolin on the setting time of the composites Portland cement-metakaolin

Dobijeni rezultati ukazuju da kompoziti portland cement - metakaolin zahtevaju veću količinu vode za postizanje standardne konzistencije od referentnog portland cementa (CEM I 42,5R), što je u saglasnosti sa istraživanjima drugih autora [1, 2].

The results indicate that composites Portland cement - metakaolin require a larger amount of water to achieve a standard consistence of the control Portland cement (CEM I 42,5R), which is in line with research by other authors [1, 2].

Svi kompoziti portland cement - metakaolin pokazali su skraćeno vreme vezivanja (početak i kraj vezivanja) u poređenju sa referentnim portland cementom, odnosno ubrzavaju početak i kraj vremena vezivanja. Najveće ubrzanje vezivanja se javlja dodatkom 15% metakaolina (MK 15), gde je početak vremena vezivanja kraći oko 40 min u odnosu na referentni uzorak.

Dobijeni rezultati su u skladu sa rezultatima istraživanjima do kojih je došao Justice [11], koja ukazuju da dodatak metakaolina ubrzava vreme vezivanja, kao i da vreme vezivanja kompozita portland cement - metakaolin zavisi od količine dodatog metakaolina.

U istraživanjima [4, 22] razlika između početka i kraja vezivanja za kompozite portland cement – metakaolin je veća i iznosi 60 min i više.

3.2 Čvrstoće pri savijanju

Rezultati uticaja metakaolina na čvrstoće pri savijanju kompozita portland-cement - metakaolin prikazani su na slici 4.

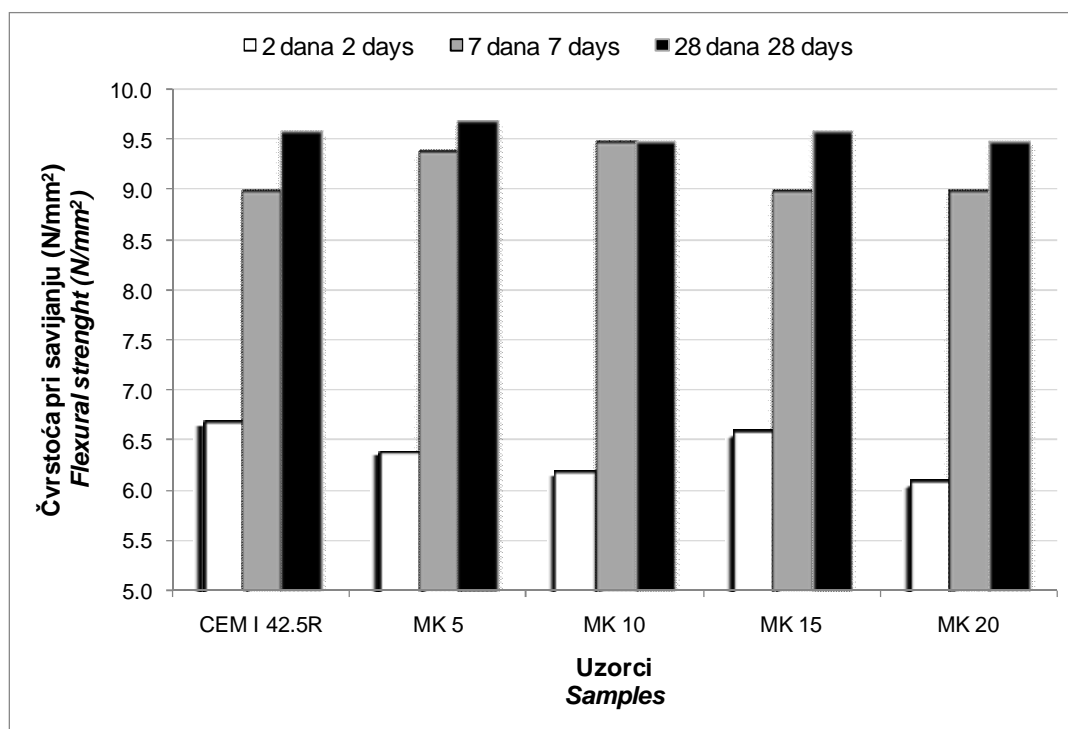
All composites Portland cement - metakaolin were showed shorter setting time (initial and final) in comparison to the control Portland cement, in other words, they accelerate initial and final setting time. The greatest acceleration occurs by adding 15% by mass metakaolin (MK 15), where the initial setting time is less than 40 minutes compared to the control sample.

The results are in line with the results of Justice [11], which indicate that addition metakaolin accelerates setting time, and that setting time of Portland composite cement depends on the amount of added metakaolin.

In researches [4, 22] difference between initial and final setting time of Portland composite cements is higher, about 60 min or more.

3.2 Flexural strengths

The influence of added metakaolin on flexural strengths of composite Portland cement - metakaolin is shown in Fig. 4.



Slika 4. Uticaj metakaolina na čvrstoće pri savijanju kompozita portland-cement – metakaolin
Figure 4 Influence of the metakaolin on the flexural strengths of the Portland composite cements

Dodatak metakaolina neznatno utiče na smanjenje čvrstoće pri savijanju kompozita portland-cement - metakaolin tokom prvih dana odležavanja (2 dana). Nakon 7 dana odležavanja kompoziti portland-cement sa dodatkom 5 % i 10 % metakaolina pokazuju više vrednosti od referentnog uzorka, dok su rezultati sa dodatkom 15 % i 20 % metakaolina identični. Nakon 28 dana, rezultati čvrstoća pri savijanju su ujednačeni, što je u saglasnosti sa rezultatima istraživanja Courard i dr [7].

Procenat dodatka metakaolina se nije pokazao kao značajan parametar za pravljenje razlike u rezultatima.

The addition of metakaolin slightly decreases flexural strengths of Portland cements composite after 2 days of curing. After 7 days, composites Portland cement with the addition of 5 and 10 % by mass metakaolin, have higher values than control sample, while the results with the addition of 15 and 20 % by mass metakaolin are identical. After 28 days, results for flexural strengths are balanced, which is in accordance with the results of Courard at all [7].

Percent of addition metakaolin did not show as a relevant parameter for making differences in the obtained results.

3.3 Čvrstoća pri pritisku

Naučna literatura jasno pokazuje da, zahvaljujući svojim pucolanskim svojstvima, metakaolin kao dodatak portland-cementu pozitivno utiče na njegove mehaničke karakteristike.

Rezultati uticaja metakaolina na čvrstoće pri pritisku kompozita portland-cement - metakaolin prikazani su na slici 5.

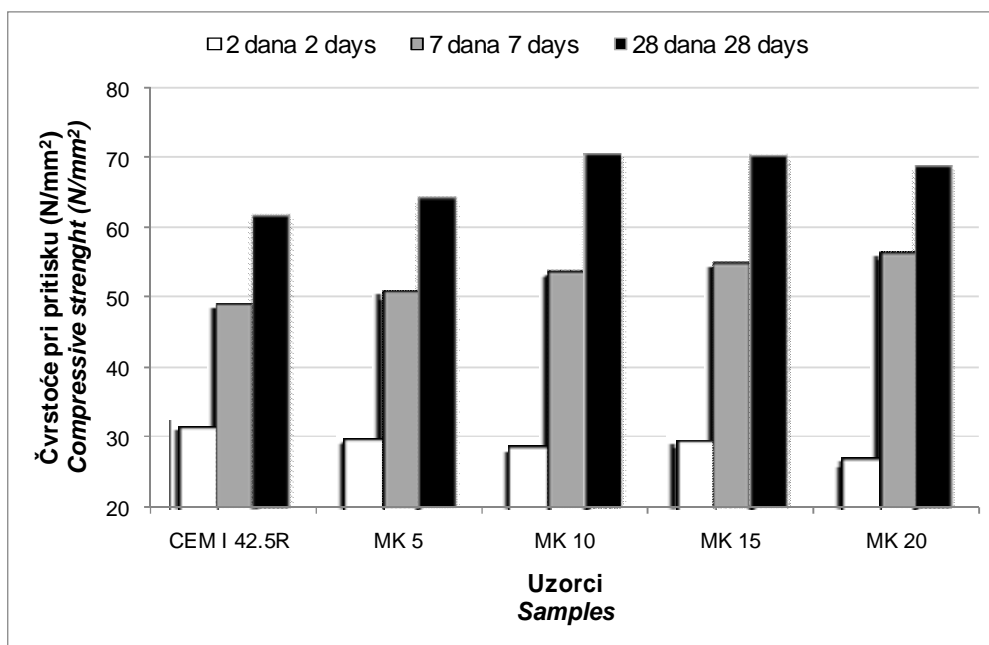
Rezultati ukazuju da dodatak metakaolina ima negativan efekat na čvrstoće pri pritisku nakon 2 dana. Ovo se objašnjava činjenicom da pucolanska reakcija još uvek nije pokazala svoj efekat. Najmanji uticaj na smanjenje čvrstoća pri pritisku nakon 2 dana ima dodatak metakaolina od 5 %, dok se dodatak 20 % metakaolina pokazao kao najnepovoljniji.

3.3 Compressive strengths

Scientific literature clearly shows that, owing to its pozzolanic properties, metakaolin addition to Portland-cement has positive influence on the mechanical characteristics.

The influence of the metakaolin addition on compressive strengths of Portland composite cements is shown in Fig. 5.

After 2 days of curing, all Portland composite cements show lower compressive strengths in comparison to the control cement. This might be explained by the fact that pozzolanic reaction still did not show its effect. After 2 days, the lower influence on compressive strength is observed with addition of 5%, while addition of 20% metakaolin is shown unfavorable.



Slika 5. Uticaj metakaolina na čvrstoće pri pritisku kompozita portland-cement – metakaolin
Figure 5 Influence of the metakaolin on the compressive strengths of the Portland

Nakon 7 dana, svi kompoziti portland-cement - metakaolin pokazuju veće čvrstoće pri pritisku od referentnog uzorka. Sa porastom dodatka metakaolina, povećava se čvrstoća pri pritisku, pa dodatak od 20 % metakaolina povećava čvrstoće za 15 % u odnosu na referentni uzorak (Slika 6).

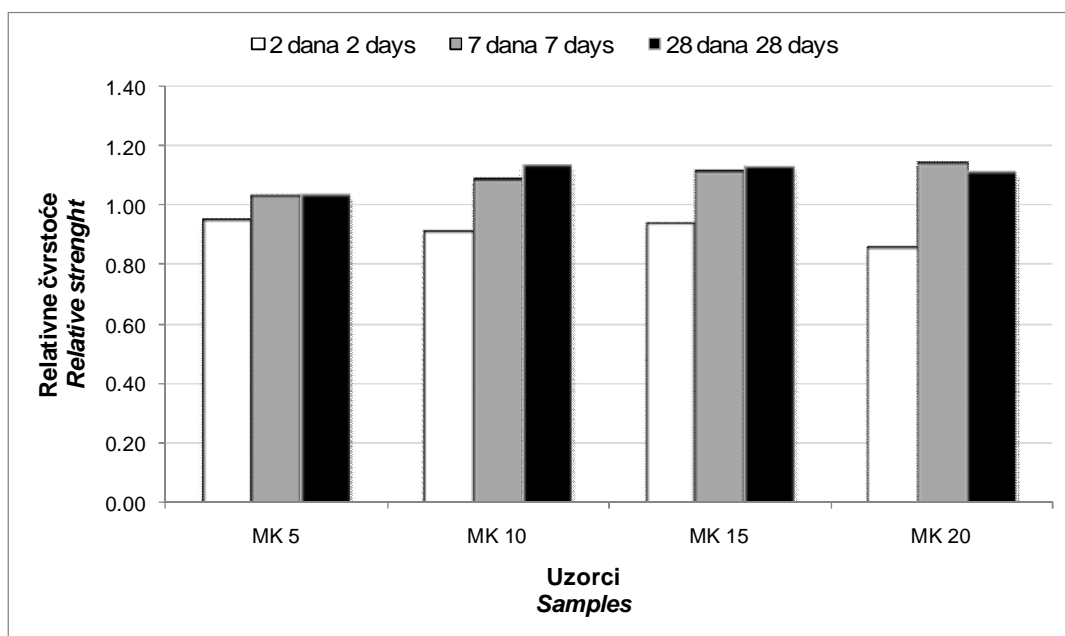
Svi kompoziti portland-cement - metakaolin pokazali su veće čvrstoće pri pritisku nakon 28 dana u odnosu na referentni uzorak. Najbolje rezultate čvrstoća pri pritisku pokazali su kompoziti portland-cementa sa 10 % i 15 % dodatka metakaolina koji povećavaju čvrstoće pri pritisku do 15 %. Već pri dodatku 20 % metakaolina, čvrstoće pri pritisku opadaju.

Dobijeni rezultati su u saglasnosti sa rezultatima drugih autora [3, 22] i podacima da dodavanje metakaolina cementu smanjuje rane čvrstoće pri pritisku, da nakon 7 dana svi uzorci pokazuju veće čvrstoće pri pritisku od referentnog uzorka (bez dodatka metakaolina), kao i da se trend rasta nastavlja i nakon 28 dana. Isti autori [3, 5] su zaključili da je optimalna količina 10 %, odnosno 15 % metakaolina.

After 7 days, all composites Portland cement - metakaolin have higher compressive strengths than control cement. The increase of addition metakaolin, increases compressive strength, so the addition of 20 % metakaolin increase compressive strength for 15 % compared to the control sample (Fig. 6).

After 28 days, all composites Portland cement - metakaolin showed higher compressive strengths than control sample. Best results of compressive strengths are showed composites with addition of 10 and 15 % by mass metakaolin, where compressive strengths increases up to 15 %. The addition of 20 % leads to compressive strengths decrease.

The results are consistent with the results of other authors [3, 22] and data, which show reduction of early compressive strengths with addition metakaolin. After 7 days all samples showed higher strength than control sample, as well as the trend of increase continues after 28 days. The same authors [3, 5] have concluded that the optimal content of metakaolin are 10% and 15%.



Slika 6. Relativne čvrstoće (u odnosu na CEM I 42,5 R) kompozita portland-cement - metakaolin u zavisnosti od količine dodatog metakaolina

Figure 6 Relative strengths of Portland composite cement (in regard to CEM I 42,5 R) dependence on added metakaolin

3.4 Skupljanje maltera

Skupljanje predstavlja deformacije koje se ispoljavaju u vidu smanjenja dimenzija u toku vremena, približno proporcionalno u svim pravcima usled zapreminskih razlika između reaktanata i proizvoda reakcije hidratacije cementa, usled isparavanja vode tokom perioda vezivanja cementa ili skupljanja nakon završetka procesa vezivanja cementa.

Rezultati skupljanja usled sušenja u zavisnosti od vremena odležavanja uzoraka prikazani su na slici 7.

Rezultati uticaja dodatka metakaolina na skupljanje maltera ukazuju da se skupljanje smanjuje sa povećanjem udela metakaolina do maksimalnih 10 % u odnosu na referentni uzorak (CEM I 42,5R), dok dalje povećanje udela metakaolina izaziva povećanje skupljanja.

Primetno je da u ranim danima odležavanja, svi kompoziti portland-cement - metakaolin pokazuju manje skupljanje u odnosu na referentni uzorak.

Ovi rezultati su u saglasnosti sa istraživanjima do kojih su došli Caldarone i dr. [6], a koji su smanjuje skupljanja sa dodatkom 10 % metakaolina, objasnili činjenicom da metakaolin utroši mnogo više slobodne vode iz sistema, ostavljajući manje vode koja bi isparavala tokom skupljanja.

Povećanje skupljanja sa porastom dodatka metakaolina (15 % i 20 % metakaolina) može se objasniti relativnim povećanjem zapremine reakcionih proizvoda, što je u skladu sa rezultatima [23].

Svi kompoziti portland-cement - metakaolin pokazuje veću brzinu skupljanja tokom prve nedelje, nakon čega dolazi do smanjenja brzine skupljanja, što je u saglasnosti sa rezultatima istraživanja Ding i Li [8].

3.4 Shrinkage of the mortars

Shrinkage represents deformations that are manifested in the form of reduced dimensions in the course of time, roughly proportional in all directions due to the volume difference between reactant and products of cement hydration reaction, by evaporation of water during the period of cement setting or shrinkage after the finishes of cement binding.

Shrinkage, as result of drying, vs. curing time is shown in Fig. 7.

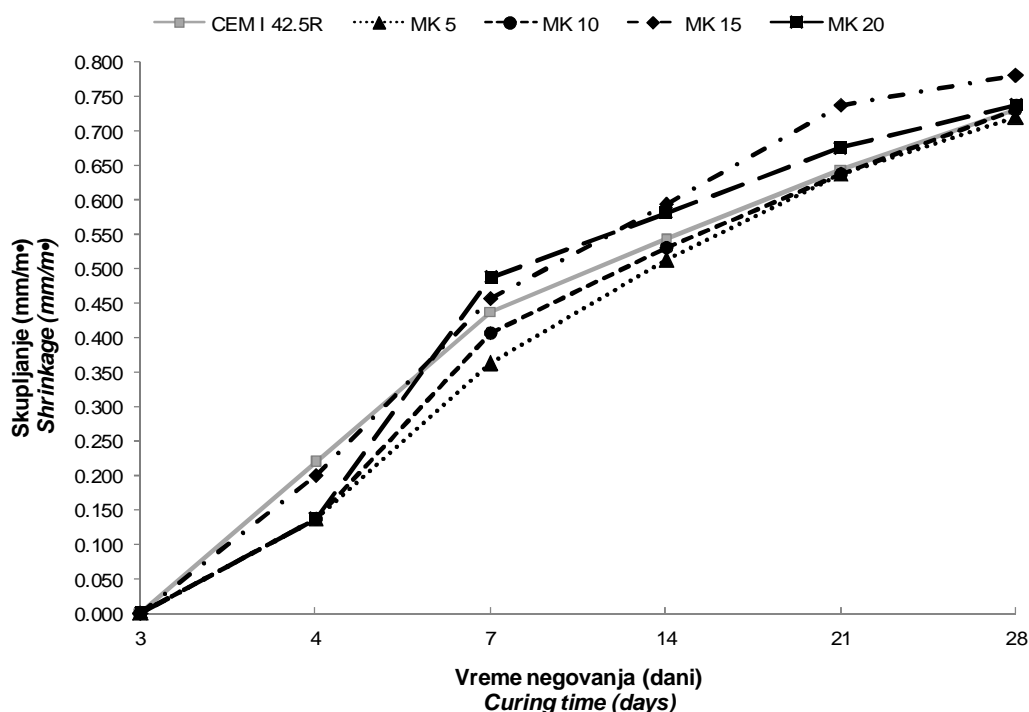
The results of the mortar shrinkage indicate that shrinkage decreases with increasing metakaolin share up to maximum of 10 %, compared to the control sample (CEM I 42,5R), while further increase of metakaolin addition, causes increased shrinkage.

It is notable that in early days of curing, all composites Portland cement –metakaolin show less shrinkage compared to the control sample.

These results are consistent with studies of Caldarone and others [6], in which decrease in shrinkage with addition of 10 % metakaolin, is explained by fact that metakaolin consumes more free water from system, living less water to evaporate during shrinkage.

Increase in shrinkage with increase metakaolin addition (15 % and 20 %) can be explained by the relative increase in volume of reaction products, which is in line with the results [23].

All composites Portland cement -metakaolin show larger shrinkage rate during the first week, after which there is a reduction in shrinkage rate, which is in accordance with the results of research of Ding and Li [8].



Slika 7. Skupljanje kompozita portland-cement - metakaolin u zavisnosti od vremena negovanja i količine dodatog metakaolina

Figure 7. Shrinkage of composite Portland cement vs. Curing time and added metakaolin

4 ZAKLJUČAK

Kompoziti portland-cement - metakaolin zahtevaju veću količinu vode od referentnog portland-cementa za postizanje standardne konzistencije.

Dodatak metakaolina skraćuje vreme vezivanja kompozita portland-cement - metakaolin, neznatno utiče na čvrstoće pri savijanju, povećava čvrstoće pri pritisku (do 15%) i smanjuje skupljanje kompozita portland-cement - metakaolin (sadržaj metakaolina do maksimalnih 10%).

Optimalna količina metakaolina u kompozitu portland-cement - metakaolin je između 10 i 15%.

Zahvalnost

Autori se zahvaljuju Ministarstvu za nauku i tehnološki razvoj Srbije na finansijskoj podršci projekta TR 19206.

5 LITERATURA REFERENCES

- [1] Badogiannis E, Kakali G, Dimopoulou G, Chaniotakis E, Tsvivilis S. Metakaolin as a main cement constituent: exploitation of poor Greek kaolins. *Cem. Concr. Compos.* 2005;27(2):197–203
- [2] Batis G, Pantazopoulou P, Tsvivilis S, Badogiannis E. The effect of metakaolin on the corrosion behavior of cement mortars. *Cem. Concr. Compos.* 2005;27(1):125–130.

4 CONCLUSION

Composites Portland cement - metakaolin require larger amounts of water from the control Portland cement to achieve standard consistence.

The addition of metakaolin reduces the setting time, it has a slight influence on flexural strength, increases compressive strength (up to 15%) and reduce shrinkage of the composite Portland cement - metakaolin (content of metakaolin up to a maximum of 10%).

Optimal content of metakaolin in the composite Portland cement – metakaolin is between 10 and 15%.

Acknowledgements

The authors wish to thanks Serbian Ministry for Science and Technological Development for financial support of research project TR 19206.

- [3] Bensted J, Barnes P. *Structure and Performance of Cements*. 2nd ed. New York: Spon Press; 2002.
- [4] Brooks JJ, Johari MAM, Mazloom M. Effect of admixtures on the setting times of high-strength concrete. *Cem. Concr. Compos.* 2000;22(1):293-301.
- [5] Cabrera J, Rojas MF. Mechanism of hydration of the metakaolin-lime-water system. *Cem. Concr. Res.* 2001;31(2):177–182.

- [6] Caldarone MA, Gruber KA, Burg RG. High reactivity metakaolin: new generation mineral admixture. *Concrete Int.* 1994; 37-40
- [7] Courard L, Darimont A, Schouterden M, Ferauche F, Willem X, Degeimbre R. Durability of mortars modified with metakaolin. *Cem. Concr. Res.* 2003;33(9):1473-1479.
- [8] Ding JT, Li ZJ. Effects of metakaolin and silica fume on properties of concrete. *ACI Materials Journal.* 2002;99(4):393-398.
- [9] EN 197-1:2000, Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements.
- [10] Habert G, Billard C., Rossi P., Chen C., Roussel N., Cement technology improvement compared to factor 4 objectives, *Cem. Concr. Res.* 2010;40 820-826.
- [11] Justice JM. Evaluation of metakaolins for use as supplementary cementitious materials. A Thesis Presented to The Academic Faculty: Georgia Institute of Technology;2005.
- [12] Largent R. Estimation de l'activite pouzzolanique. *Bull. Liaison Lab. Pont Chausees.* 1978;93:61.
- [13] Mindess S, Young FJ, Darwin D. *Concrete.* 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall: 2003
- [14] Mitrović A, Đuričić R, Ilić B, Živanović B, Metakaolin: nova generacija dopunskih cementnih materijala, *Materijali i konstrukcije* 48, 2005, 48-54.
- [15] Mitrović A, Miličić Lj, Ilić B, Benefits of use metakaolin in cement-based systems, *Internacionalni Naučno-Stručni skup Građevinarstvo – Nauka i praksa, Žabljak, 15-19. februar 2010, 753-757.*
- [16] SRPS B.C1.011:2001, Cement. Portland-cement, portland-kompozitni cement, metalurški cement, pucolanski cement, kompozitni cement. Definicije, klasifikacija i tehnički uslovi.
- [17] SRPS B.C8.029:1979, Linearne deformacije - Skupljanje maltera usled sušenja.
- [18] SRPS EN 196-1:2008, Metode ispitivanja cementa- Ispitivanje čvrstoće.
- [19] SRPS EN 196-2:2008, Metode ispitivanja cementa- Hemijske analize cementa.
- [20] SRPS EN 196-3:2007, Metode ispitivanja cementa- Određivanje vremena vezivanja i stalnosti zapremine.
- [21] SRPS EN 196-6:1995, Metode ispitivanja cementa- Određivanje finoće mliva.
- [22] Vu DD, Stroeven P, Bui VB. Strength and durability aspects of calcined kaolin-blended Portland cement mortar and concrete. *Cem. Concr. Compos.* 2001;23(6):471-478.
- [23] Wild S, Khatib JM, Roose LJ. Chemical and autogenous shrinkage of Portland cement-metakaolin pastes. *Adv. Cem. Res.* 1998;10(3):109-119.

REZIME

KARAKTERISTIKE PORTLAND CEMENTA SA DODATKOM METAKAOLINA DOBIJENOG KALCINACIJOM DOMAĆE KAOLINSKE GLINE

Aleksandra MITROVIĆ
 Dragica JEVTIĆ
 Ljiljana MILIČIĆ
 Biljana ILIĆ

U Institutu za ispitivanje materijala IMS-Beograd razvijena je tehnologija za dobijanje pucolanskog dodatka - metakaolina iz domaće kaolinske gline Vrbica. Verifikacija pucolanskog ponašanja proizvedenog metakaolina izvršena je određivanjem karakteristika portland cementa sa dodatkom 5 - 20 % metakaolina i upoređenjem sa karakteristikama portland cementa. Upoređenjem karakteristika portland cementa (CEM I) i cementa sa dodatkom metakaolina (CEM II) utvrđeno je da se dodatkom metakaolina skraćuje vreme vezivanja (početak i kraj) i postižu niže vrednosti čvrstoća pri pritisku nakon 2 dana. Nezavisno od udela metakaolina, čvrstoća pri pritisku nakon 7 i 28 dana je veća od čvrstoća portland cementa. Utvrđeno je da se pri dodatku 10 i 15 % metakaolina cementu, čvrstoća pri pritisku povećava približno 15 %.

Ključne reči: kaolinska glina, metakaolin, cement, mehaničke karakteristike.

SUMMARY

CHARACTERISTICS OF PORTLAND CEMENT WITH ADDITION OF METAKAOLIN OBTAINED BY CALCINATION OF DOMESTIC KAOLIN CLAY

Aleksandra MITROVIĆ
 Dragica JEVTIĆ
 Ljiljana MILIČIĆ
 Biljana ILIĆ

The technology for obtaining pozzolanic additive – metakaolin, from domestic kaolin clay Vrbica, is developed in the Institute for testing of materials IMS-Belgrade. Pozzolanic behavior of the produced metakaolin is verified by determining the characteristics of Portland cement made with addition of 5 to 20 % by mass metakaolin. The characteristics of Portland cement made with addition of metakaolin (CEM II) were compared with Portland cement (CEM I), which was used as a control sample. The composite cements have lower setting time (initial and final) as well as compressive strengths after 2 days. Compressive strengths after 7 and 28 days are greater than compressive strengths obtained for the control cement, independently on the metakaolin content. The addition of 10 and 15 % by mass metakaolin increases compressive strengths for approximately 15 %.

Key words: kaolin clay, metakaolin, cement, mechanical characteristics.

ENERGETSKA EFIKASNOST I TEHNOLOGIJE PRIMJENE STAKLA U ARHITEKTONSKOM PROJEKTOVANJU

ENERGY EFFICIENCY AND GLASS TECHNOLOGY USED IN ARCHITECTURAL DESIGNS

Ratko MITROVIĆ

STRUČNI RAD
UDK: 624.012.6 = 861

1 UVOD

Početak primjene stakla datira još od 5000. godine prije nove ere, kada su u Egiptu počeli praviti dekorativne predmete i nakit od ovog materijala. Prvi prozor od stakla je napravljen oko 100. godine nove ere u Rimu, a 600. godine je proizvedeno poznato normadijsko staklo, maksimalnih dimenzija do 2 m i neravne površine. U Francuskoj je oko 1670. godine počela primjena valjaka u proizvodnji stakla, pa su se mogle dobiti ravnije površine većih dimenzija. Belgijanac Furko 1904. godine patentira svoj revolucionarni izum proizvodnje stakla izvlačenjem. U Francuskoj se 1910. godine prvi put proizvodi višeslojno staklo, 1920 godine armirano staklo, 1928 godine počinje proizvodnja stakla sa ojačanim mehaničkim karakteristikama, a 1930 godine se počinje proizvoditi kaljeno staklo. To su počeci u tehnologiji proizvodnje i mogućnosti primjene stakla, a pravi razvoj ovih tehnologija vezan je za posleđenjih nekoliko decenija. U savremenom arhitektonskom projektovanju tehnološke mogućnosti primjene stakla u projektovanju su daleko veće nego kada su u pitanju drugi materijali. Tehnološki napredak je u ovom periodu toliko dinamičan i značajan da je prilično teško pratiti razvoj i mogućnosti primjene ovog materijala kod arhitektonskog projektovanja. Adekvatna primjena stakla u arhitektonskom projektovanju sve više dobija na značaju, jer primjena principa energetske efikasnosti postaje osnova za izradu projektnih rješenja kod objekata visokogradnje. Tim novim tehnologijama u proizvodnji stakla koje omogućavaju projektovanje objekata sa elementima energetski efikasnih zgrada i inteligentnih objekata, a, sa druge strane, dobro arhitektonsko oblikovanje objekata visokogradnje, posvećen je ovaj rad.

Prof.dr Ratko Mitrović, Arhitektonski fakultet, ul. Džordža Vašingtona b.b. Podgorica

1 INTRODUCTION

The history of glass use dates from 5000 B.C. in Egypt when decorative objects and jewels were first made of this material. The first glass window was made around the year 100 AD in Rome, and in 600 the famous Norman glass was produced, with maximum dimensions of up to 2 m and with uneven surface. In France, around 1670, the roller was first used in glass production; therefore more even surfaces with bigger dimensions could have been obtained. Belgian Furko in 1904 patented his revolutionary invention of glass production by pulling. In 1910 in France the multilayer glass was produced for the first time, and the reinforced glass in 1920. In 1928 the glass production with reinforced mechanical characteristics was developed, while in 1930 the tempered glass was produced. These are the beginnings of the production technology and possibility of glass use, and the real development of these technologies has been associated to the last few decades. In modern architectural designs the technological possibilities of glass use in designs are higher compared to other materials. The technological progress in this period has been so dynamic and important that it is hard to follow the development and possibility of use of this material in architectural designs. Adequate glass use in architectural designs is becoming more and more important, because the use of the principles of energy efficiency is becoming the basis for the design of project solutions for buildings. This paper is dedicated to these new technologies in glass production which enable the design of objects with the elements of energetically efficient buildings and intelligent buildings, and, on the other hand, good architectural design of buildings.

PhD Ratko Mitrović, Faculty of Architecture, Džordža Vašingtona b.b. Podgorica

2 OBLASTI PRIMJENE STAKLA U ARHITEKTONSKOM PROJEKTOVANJU OBJEKATA VISOKOGRADNJE

Savremena arhitektura je, prije svega, arhitektura svijetla i svjetlosnih efekata. Transparentne, svjetlopropustljive gradjevine sa ostakljenim fasadama velikih površina omogućavaju idealno povezivanje spoljne sa unutrašnjom svetlošću, čime je ostvaren jedan od najvažnijih uslova za ljudsko zdravlje – prirodno dnevno svjetlo, odnosno udobnost življenja u prostoru [1-2].

Savremene tehnologije su omogućile primjenu stakla u svim segmentima projektovanja, a kod nas se najviše primjenjuje u obradi strukturalnih i polustrukturalnih fasada, izradi prozora, ostakljavanja atijuma, izradi sigurnosnih stakala, ograda kod stepeništa i terasa i dr. Ali ni izbliza nijesu iskorišćene mogućnosti ovog materijala kod izrade eneterijera i eksterijera, pa čak i kod izrade nekih konstruktivnih detalja. Nove tehnologije su omogućile izradu stakala u različitim bojama, nijansama i obradama, počev od sitoštampe, dodavanja raznih folija željenih boja, pa sve do softiciranog upravljanja bojom i prozirnošću staklenih površina^{(5) (6) (7)}. Staklo može da se primjenjuje za izradu eneterijera, pregradnih zidova i panela u željenom dizajnu, zatim u izradi vrata, stepeništa, nastrešnica, podova i plafona, i to u kombinaciji sa svjetlosnim efektima koji postaju moćan alat arhitekta. Treba pomenuti i primjenu ovog materijala kod izrade polica, detalja namještaja, sanitarija i ekskluzivnog eneterijera u željenim nijansama, jer je staklo od proizvodnje ukrasnih detalja i počelo da se razvija, a ne samo da može zadovoljiti sve kriterijume termičke i zvučne izolacije, nego i omogućava da se dobije željena forma, to jest da se oblikuje u oble forme prema postavljenom projektnom rješenju.

Primjena stakla kod izrade konstruktivnih elemenata objekata visokogradnje je oblast koja se u poslednje vrijeme brzo razvija, uglavnom zahvaljujući razvoju tehnologija proizvodnje stakla i dobijanju stakala većih mehaničkih karakteristika [8-10]. Ova konstruktivna rješenja su nešto skuplja od klasičnih rješenja, ali kod eneterijera često prevladaju i estetski efekti prostora u odnosu na cijenu koštanja izrade detalja.

Kada je u pitanju energetska efikasnost, najvažniji detalj je projektno rješenje fasade objekta, odnosno kolika će biti potrošnja energije projektovanog objekta u eksploataciji. Kod rješavanja ovih detalja projektant se često nalazi u velikoj dilemi koliki obim staklene fasade da predvidi, koju transparentnost stakla da usvoji i koji stepen refleksije, te kakve termičke karakteristike, koje boje i nijanse i kakve mehaničke karakteristike. Da bi mogao da odluči o vrsti i obimu stakla na fasadi objekta, neophodno je dobro poznavanje novih tehnologija stakla i njihovih karakteristika po svim gore pomenutim parametrima sa ciljem ostvarivanja osmišljenog arhitektonskog rješenja.

U daljem izlaganju akcenat je stavljen na projektovanje energetske efikasne zgrade, iako su i drugi pomenuti detalji i mogućnosti stakla veoma značajni za arhitektonsko projektovanje objekata visokogradnje, ali će to biti tema za neki drugi rad i istraživanje.

3 AREAS OF GLASS USE IN ARCHITECTURAL DESIGN OF BUILDINGS

The contemporary architecture is primarily the architecture of light and light effects. Transparent, light-permeable structures with glass facades with big surfaces enable ideal connection of the external with the internal light, which enables the achievement of the one of the most important conditions for human health – natural day light, i.e. the comfort of living in space [1-2].

Contemporary technologies enabled the use of glass in all the segments of design, and in our country it is mostly used in the treatment of structural and semi-structural facades, windows production, atrium glazing, production of safety glasses, stair and terrace fences etc. But the possibilities of this material are not even closely used enough in the interior and exterior design, or in the design of some construction details. New technologies enabled the production of glass in different colours, shades and treatment, starting from screen printing, adding of different foils with desired colours, to sophisticated colour management and permeability of glass surfaces^{(5) (6) (7)}. Glass can be used for the interior design, walls design and panels in the desired design, then doors, stairs, penthouses, floors and ceilings, in combination with light effects which become a powerful architect's tool. The material is used as well in the production of shelves, furniture details, sanitations and exclusive interior in desired shades, because the glass was first produced as decorative detail. It can satisfy all the criteria for thermal and acoustic isolation, but it also enables to obtain the desired form, i.e. round forms according to the prescribed design solution.

The use of glass in the production of structural elements of buildings is the area which has been rapidly developed lately, mostly due to the development of glass production technologies and obtaining of glass with greater mechanical characteristics [8-10]. These construction solutions are more expensive than the classical ones, but in the interior often prevail esthetical elements of the space with regard to the price of the production of details.

As to energy efficiency, the most important detail is the design solution of the building facade, i.e. the energy consumption of the projected building in exploitation. In resolution of these details the designer often has a dilemma how to predict the glass facade volume, which glass transparency, reflection degree, thermal characteristics, colours and shades and mechanical characteristics to choose. In order to decide about the type and volume of glass in the façade of the facility, it is necessary to know new glass technologies and their characteristics for all the above-mentioned parameters in order to achieve the designed architectural solutions.

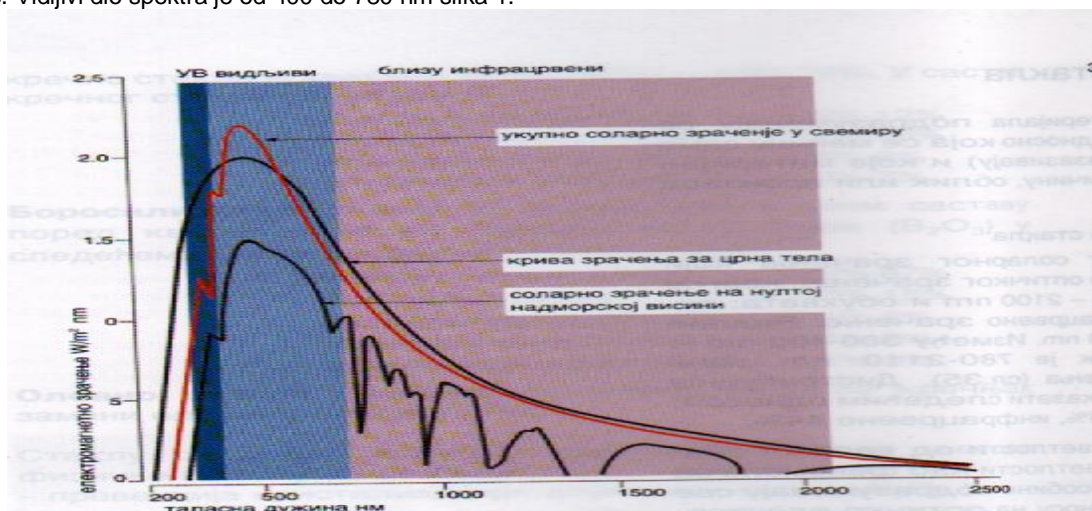
Further in this paper the accent will be on the design of energetically efficient buildings. Although the other above-mentioned details and glass possibilities are very important for the architectural design of the buildings as well, they will be the subject of another paper and research.

3 TEHNOLOGIJE STAKLA ZA IZRADU FASADNIH ELEMENATA OBJEKATA VISOKOGRADNJE

Klasično staklo je veoma transparentan materijal sa velikom čvrstoćom i malom otpornošću na udar, a njegove karakteristike, uglavnom, zavise od hemijskog sastava, tehnologije proizvodnje, načina prerade i dorade. Sve ove osobine mogu se pojaviti u različitim oblicima i kombinacijama što omogućava dobijanje šire lepeze proizvoda koji se mogu primjenjivati u arhitektonskom projektovanju.

3.1 Optičke i energetske karakteristike stakla

Solarno elektromagnetno zračenje je dio optičkog zračenja koje se kreće u talasnim dužinama od 290 do 2100 nm i obuhvata vidljivo, ultraljubičasto i infracrveno zračenje. Vidljivi dio spektra je od 400 do 780 nm slika 1.



Slika 1. Prikaz solarnog elektromagnetnog zračenja, prema [3]
Figure 1. Presentation of solar electromagnetic radiation, after [3]

Za arhitektonsko projektovanje je od velikog značaja propuštanje svjetlosti, posebno ako se uzme u obzir značaj svjetlosti kao fenomena za percepciju u prostoru. Optičke osobine podrazumijevaju sve karakteristike materijala u odnosu na optičko elektromagnetno zračenje, a posebno u odnosu na vidljivi dio spektra što, u suštini, zavisi od vrste stakla.

Kod običnog čistog stakla debljine 6 mm, kada svjetlost padne na njega reflektuje se 4%, od 1.6 do 2.5 % bude absorbovano, a ostatak (od 91 do 92 %) biva propušten u prostor.

Osnovne karakteristike stakla se mogu definisati u odnosu na količinu propuštene svjetlosti i energije u prostor, količinu refleksije svjetlosti i energije od staklene površine i količinu svjetlosne energije koju akumulira, što je prikazano na slici 2.

Toplotno i svjetlosno zračenje sunca snažno utiču na klimu nekog prostora, kao i na energetske potrebe objekata, tako da je u fazi arhitektonskog projektovanja potrebno ostvariti sledeće ciljeve:

1. zaštititi pretjerano zagrijavanje unutrašnjeg prostora,
2. spriječiti rashladjivanje prostora pri niskim spoljnim

3 GLASS TECHNOLOGIES FOR THE PRODUCTION OF FAÇADE ELEMENTS OF THE BUILDINGS

Classical glass is a very transparent material, very strong and slightly resistant to impacts, and its characteristics mostly depend on the chemical content, production technology, and the way of processing and finishing. All these properties can appear in different forms and combinations, which enables high variety of products that can be used in architectural design.

3.1 Optical properties and energy of glass

Solar electromagnetic radiation is the part of optical radiation within the wave lengths from 290 to 2100 nm. It includes visible, ultraviolet and infrared radiation. The visible part of the spectra is from 400 to 780 nm, Figure 1.

For architectural design the light transparency is very important, particularly considering the importance of light as a phenomenon for perception in space. Optical properties imply all the properties of the material with regard to optical electromagnetic radiation, and particularly with regard to the visible part of the spectra which basically depends on the type of glass. When the light falls on ordinary clear glass with thickness of 6 mm, 4% is reflected, 1.6 - 2.5% is absorbed and the rest (91-92 %) is released in space. The basic characteristics of glass can be defined with regard to the amount of the released light and energy into space, amount of light reflection and energy from glass surface and amount of accumulated light energy, shown in Figure 2.

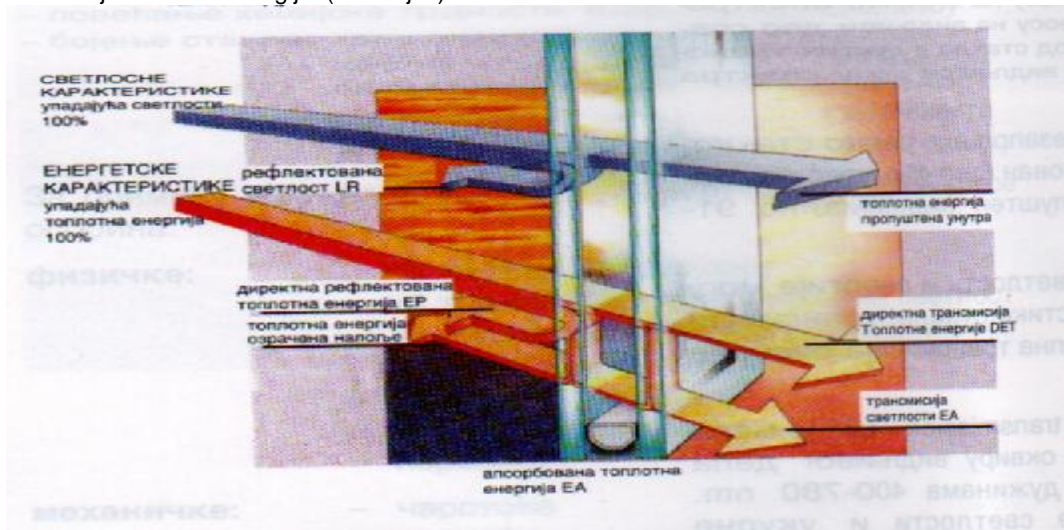
Thermal and light radiation of the sun have high influence on the climate of an area, as well as on the energy demands of the facilities. Therefore in the architectural design phase it is necessary to achieve the following objectives:

1. protect the interior from excessive heating,
2. protect the space from cooling with low exterior temperatures,
3. ensure pleasant and uniform climate,

temperaturama,

3. osigurati prijatnu i ujednačenu klimu,
4. znatno smanjiti troškove energije (zimi i ljeti)

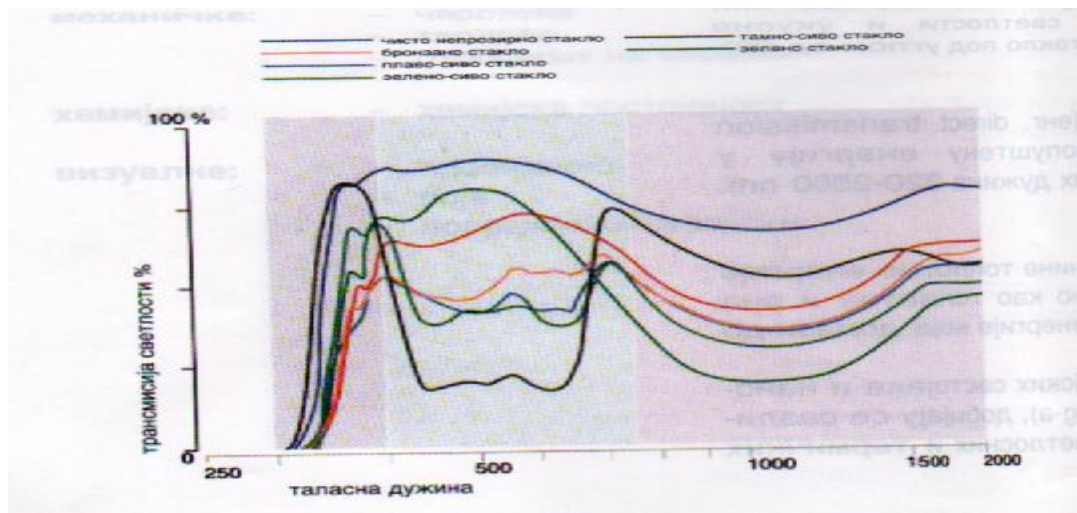
4. significantly reduce energy consumption (in winter and summer).



Slika 2. Prikaz svjetlosnih i energetskih karakteristika stakla [3]
Figure 2. Presentation of lighting and thermal characteristics of glass [3]

Transmisija, odnosno propustljivost svjetlosti je jedna od najvažnijih karakteristika stakla i u izradi arhitektonskih projekata često je odlučujuća kod izbora vrste stakla. Na slici 3 je prikazana transmisija svjetlosti kod običnog stakla i kod stakala različitih boja. Tu se može vidjeti da je za različite boje stakla i koeficijent transmisije različit.

The transmission, i.e. transparency of light is one of the most important glass characteristics and it is often crucial in selection of the type of glass for the design of architectural projects. Figure 3 shows the transmission of light in ordinary glass and glasses with different colours. It is evident the difference in transmission coefficient for different glass colours.



Slika 3. Zavisnost transmisije sunčeve svjetlosti u prostor od boje stakala [3]
Figure 3. Dependence of the sun light transmission within certain area on the colour of glass [3]

Sa druge strane, veoma bitne osobine stakla su termičke osobine, koeficijent specifične toplote i koeficijent prolaza toplote koji je posebno značajan. Koeficijent prolaza toplote (U) je vrijednost po DIN EN 673, a označava jedinični gubitak toplote koju uzrokuje građevinski element. Danas je optimalna vrijednost $U_g=1.0$ w/m²K (što je vrijednost manja, toplotna izolacija je bolja).

Staklo spada u grupu građevinskih materijala koji su

On the other hand, very important glass properties are thermal properties, specific heat coefficient and particularly heat transfer coefficient. Heat transfer coefficient (U) is the value according to DIN EN 673, and it represents the unit heat loss caused by the construction elements. Today the optimal value is $U_g=1.0$ w/m²K (if the value is lower heat isolation is better).

Glass belongs to the group of construction materials

dobri provodnici toplote i iz tih razloga predstavljaju često kritična mjesta po pitnju toplotnih gubitaka.

4 DILEME I PREPORUKE KOD IZBORA TIPA STAKLA

Za staklene fasade vrijede specijalni zahtjevi iz Pravilnika EU EnEV o uštedi energije od 2002. godine, gdje kod zagrijavanja građevina treba uzimati u obzir energetski bilans, ako površina stakla na objektu prelazi 30 % fasade, unos sunca ne smije prelaziti maksimalne vrijednosti S_{max} propisane ovim pravilnikom.

Zahvaljujući bojama i različitim refleksijama stakla, stakla za zaštitu od sunca pružaju brojne mogućnosti u oblikovanju fasada. Stakla sa izrazitom refleksijom posebno će naglasiti jedinstven izgled i odsjaj okolnih objekata i okruženja na staklenoj fasadi⁽⁴⁾. Kod onih sa manjom refleksijom ne može se izbjeći različiti izgled transparentnog i neprovidnog stakla. Osnovna dilema koja se postavlja kod izbora tipa stakla je, ako se želi veća transmisija svjetlosti u prostor, kako izbjeći ulazak toplotne energije putem sunčevog zračenja u prostor u ljetnjem periodu. Drugi problem je kada se želi veća prolaznost svjetlosti u prostor kako izbjeći povećane toplotne gubitke iz prostora prema vani. Ovim problemima su se u posljednje vrijeme bavile savremene tehnologije proizvodnje stakla, pogotovo kada su u pitanju izgradnja fasada objekata visokogradnje gdje je dominantno učešće strukturalne i polustrukturalne fasade. U principu, tražilo se staklo koje ima veliku transmisiju, koje sprečava povišeni ulazak toplote u prostor u ljetnjem periodu i koje ima manji koeficijent toplotne provodljivosti (u), a uz sve to omogućava ostvarenje željenih estetskih zahtjeva. Put razvoja ovih tehnologija je bio veoma dug, ali sada imamo mogućnost da izaberemo vrste stakla koje će nam najviše odgovarati u projektnom rješenju i koja će omogućiti izgradnju energetski efikasnog objekta.

Da bi se lakše rješavale pomenute specifičnosti, proizvođači su razvili tehnologije proizvodnje sledeće grupe stakala:

Low-E-STAKLA (stakla za kontrolu izlaska toplote), Solar Control Glass (stakla za kontrolu ulaska svjetlosti i toplote) i COOL-LITE (stakla koja imaju karakteristike i Low-E stakla i stakla za kontrolu ulaska svjetlosti i toplote).

Parametri koji definišu SVJETLOSNO-TOPLOTNU kontrolu stakla:

TL % = transmisija svijetla

RL % = refleksija svijetla

g-vrijednOst solarni faktor

U-vrijednost W/m^2K = koef. toplotne provodljivosti

Selektivnost = odnos primljene svjetlosti/absorb. energije, Tl/g -vrijednost (60/32= selectivity 1,88) .

Stepen transmisije svjetlosti po DIN EN 410 označava koliko posto vidljive svetlosti kroz staklo dopijeva u prostor. Danas je pravilo, što više to bolje.

Vrijednost stakla označava toplotnu energiju koja putem sunčevog zračenja dopijeva u prostor. Po DIN EN410 g-vrijednost se sastoji od dva faktora: od direktne energije zračenja sunca i absorbovane energije koju staklo propušta unutar prostora putem toplotnog zračenja.

which are good heat conductors, and therefore critical places regarding heat losses.

4 DILEMMAS AND RECOMMENDATIONS FOR THE SELECTION OF THE TYPE OF GLASS

There are special requirements for glass facades from the Regulations of EU EnEV on the energy saving from 2002, where the heating of buildings should take into account the energy balance. If the glass surface in the building exceeds 30% of the facade, the entry of the sun should not exceed maximum values S_{max} prescribed by these Regulations.

Due to colours and different glass reflections, glasses for sun protection give numerous possibilities in facade design. Glasses with distinct reflection will particularly emphasize the unique exterior and reflection of the surrounding facilities and environment on the glass facade⁽⁴⁾. The glasses with lower reflection cannot avoid different appearance of transparent and opaque glass. The basic dilemma in the selection of the type of glass in case of demanding for higher transmission of light in space is how to avoid the entry of thermal energy of the sun in space during summer. The other problem in case of demands for higher light permeability in space is to avoid higher heat losses from the space to the outside. These problems have been lately the subject of contemporary technologies of glass production, especially regarding the construction of building facades where structural and semi-structural facades are dominant. Generally, the glass with higher transmission was demanded in order to protect the space from the excessive heat entry during summer with lower coefficient of heat conductivity (U), and enable the achievement of the desired esthetical demands. The development of these technologies had a very long way, but now we have the possibility to choose the type of glass which will be more appropriate in design solution and which will enable the construction of energetically efficient building.

In order to resolve the named particularities more easily the producers have developed the production technologies of the following glass types:

Low E-glasses (glasses for the control of heat release), Solar Control Glass (glasses for the control of light and heat entry) and COOL-LITE (glasses with both characteristics of the Low E-glasses and glasses for the control of light and heat entry).

The parameters which define LIGHT AND HEAT control of the glasses are:

TL % = light transmission

RL % = light reflection

g-value solar factor

U-value W/m^2K = heat conductivity coefficient

Selectivity = received light/absorbed energy ratio, Tl/g -value (60/32 = selectivity 1,88) .

The degree of light transmission according to DIN EN 410 indicates the percentage of visible light which reaches the space through the glass. Nowadays the rule says: "the more, the better".

The value of the glass indicates the thermal energy which reaches the space through the sun radiation. According to DIN EN 410 g-value consists of two factors: direct sun radiation energy and absorbed energy let through glass inside the space by thermal radiation.

4.1 LOW-E-stakla (stakla za kontrolu izlaska toplote)

Kod ove grupe proizvoda debljina stakla se kreće od 4 do 16 mm, u vazdušnom prostoru se dodaje gas, uglavnom argon, koeficijent toplotne provodljivosti (U) je od 1.1 do 1.4 W/ m²K, transmisija od 60 do 80%, refleksija od 10 do 30 %, i solarni faktor (g) od 0.4 do 0.7. Kakve će konkretne karakteristike imati određeno staklo zavisi od vrste stakla i proizvođača. U svakom slučaju, u ovu grupu stakala spadaju transparentna stakla, što je za arhitektonska rješenja, koja zahtijevaju veću prozirnost i vidljivost spljnog i unutrašnjeg prostora, jako značajno. Takođe značajna osobina ovih stakla je da se mogu kaliti i laminirati.

4.2 SOLAR CONTROL GLASS (stakla za kontrolu ulaska svjetlosti i toplote)

Osnovna karakteristika ovog tipa stakla je kontrola ulaska svjetlosti i toplote u prostor, i mogućnost nanošenja tvrdih filmova na površinu stakla, kaljenje, savijanje, laminiranje, emajliranje i obrada stakla.

Tabela 1. Osnovne karakteristike stakla tipa Solar Control Glass [12]
Table 1. Basic characteristics of the Solar Control Glass type are shown [12]

	TL	RL	g	U	Selectivity
SGG ANTELIO silver	59	31	0,48	1,1	1,23
SGG ANTELIO clear	41	27	0,38	1,1	1,08
SGG ANTELIO emerald	48	21	0,31	1,1	1,55
SGG ANTELIO bronze	21	12	0,24	1,1	0,88

Iz tabele 1. se može vidjeti da ovaj tip stakala ima manju transparentnost do 60%, zatim da je toplotna provodljivost dobra (oko 1.1 W/ m²K), dok je solarni faktor nešto niži, te da je refleksija kod određenih vrsta značajna. Koji će se tip stakla usvojiti uglavnom zavisi od potrebe arhitektonskog rješenja za transparentnošću i refleksijom.

4.3 COOL-LITE (stakla koja imaju karakteristike i Low-E stakla i stakla za kontrolu ulaska svjetlosti i toplote).

Ova stakla spadaju u red stakala savremenije tehnologije i često daju rješenja, kada druge pomenute vrste stakala ne mogu da zadovolje potrebe arhitektonskog projekta. Ova vrsta stakala omogućava dobru zaštitu od sunca i toplote i daje velike arhitektonske mogućnosti, a s obzirom na izuzetnu

4.1 LOW E-GLASSES (glasses for the control of heat release)

Within this group of products glass thickness ranges from 4 to 16 mm; in the air space gas is added, mostly argon; heat conductivity coefficient (U) is 1.1- 1.4 W/ m²K, transmission is 60 - 80%, reflection is 10 - 30% and solar factor (g) is 0.4 - 0.7. Which properties will certain glass have depends on the type of glass and producer. In any case, this group of glasses includes transparent glasses, which is very important for architectural solutions that require higher transparency and visibility of the exterior and the interior. Also the important characteristic of these glasses is that they can be hardened and laminated.

4.2 SOLAR CONTROL GLASS (glasses for the control of light and heat entry)

The basic characteristic of this type of glass is the control of heat and light entry in space, and the possibility of applying solid films on glass surface, hardening, bending, laminating, emailing and processing of glass.

In Table 1 it can be seen that this type of glass is less transparent, up to 60%, heat conductivity is good (around 1.1 W/ m²K), while solar factor is a bit lower, and the reflection of certain types is significant. Which types of glass will be used depends mostly on the needs of architectural solutions for transparency and reflection.

4.3 COOL-LITE (glasses with both characteristics of Low – E glass and glass for the control of light and heat entry).

These glasses belong to the group of contemporary technology glasses and they are often good solution when other named types of glass can not satisfy the needs of architectural design. This type of glass enables good sun and heat protection and the ability of adaptation. It can be used on large facade surfaces which are intensively exposed to the sun. The colours of

zaštitu od sunca i sposobnost prilagođavanja, može se koristiti i na velikim površinama fasada koje su intenzivno izložene suncu. Boje ovih stakala se mogu individualno definisati, stakla se takođe mogu individualno oblikovati i tako omogućiti savijanje i zaobljene frontove fasada. Ova vrsta stakla se bazira na slojevima plemenitog metala koji se nalazi unutar stakala i nije izložen vremenskom uticaju. Taj sloj filtrira svjetlost koja pada na staklo, tako da ne dolazi do pretjeranog zagrijavanja prostora, istovremeno propušta svjetlo u mjeri potrebnoj za ugodnu atmosferu, uz minimalno propustanje energije, što je jako značajno u arhitektonskom projektovanju.



these glasses can be individually defined, glasses can be also individually shaped and therefore they can enable bending and shaping of the facade fronts. This type of glass is based on the layers of precious metals contained within the glass and it is not exposed to weather influence. The layer filters the light that falls on the glass, so there is no excessive heating of the area, and at the same time it lets the light in amounts necessary for comfortable atmosphere, with minimum energy leak, which is very important in architectural design.



Slika 4. Prikaz objekta izvedenog od Low-E-STAKLA i Solar Control Glass tipa SGG ANTELIO od istog proizvođača [12]

Figure 4. Presentation of the building made of Low E glass and Solar Control Glass SGG ANTELIO type of the same manufacturer [12]

Razlike u transparentnosti svjetlosti i solarnog faktora kod ovog tipa stakala najbolje se može uočiti na slici 4. gdje se radi o istom renomiranom proizvođaču, čiji je cilj da svojim proizvodnim programom omogući širi izbor proizvoda kod izrade arhitektonskih projekata.

The differences in light transparency and solar factor for this glass type can be noticed most easily in Figure 4, the same renowned manufacturer, whose objective is to enable with its production program wider selection of the products in design of architectural projects.

Tabela 2. Osnovne karakteristike za različite vrste stakla tipa COOL-LITE [12]
Table 2. Basic characteristics of different types of glass COOL-LITE [12]

	T_L	R_L	g	U	S
SGG COOL-LITE SKN 172	67	9	0,40	1,2	1,68
SGG COOL-LITE SKN 174 SGG COOL-LITE SKN 174II	68	11	0,41	1,1	1,66
SGG COOL-LITE SKN 165 SGG COOL-LITE SKN 165II	60	15	0,32	1,1	1,88
SGG COOL-LITE SKN 154 SGG COOL-LITE SKN 154II*	50	17	0,27	1,1	1,85
SGG COOL-LITE SKN 144**	40	17	0,21	1,1	1,90

Iz tabele 2. se vidi da ovaj tip stakala omogućava veću transparentnost (čak do 70 %), dok je refleksija

In Table 2 it can be seen that this type of glass enables higher transparency (even up to 70%), while the

svjetlosti znatno manja nego kod prethodne vrste stakla. Solarni faktor je znatno veći nego kod prethodno opisanih vrsta, što ukazuje na to da ovaj tip stakla omogućava veću transparentnost stakala, a da pri tome ima veću vrijednost solarnog faktora, što je jako značajno, pogotovo kada se želi postići veća energetska efikasnost arhitektonskih rješenja (što je veći solarni faktor, veća je transmisija stakla, a samim tim i manji gubici energije).

Na slici 5. je prikazan primjer izbora stakla kod koga arhitektonsko rješenje zahtijeva veću transparentnost unutrašnjeg prostora pri pogledu na objektat iz okruženja. Želja autora projekta je bila da se istaknu elementi noseće konstrukcije i da unutrašnjost objekta bude vidna za posmatrača koji se nalazi van objekta, kao i to da posmatrač iz objekta može bolje vidjeti okruženje oko njega. U suštini, željela se ostvariti bolja veza unutrašnjosti objekta sa okruženjem. Da bi se ovi efekti postigli projektant je usvojio staklo tipa „**SGG COOL-LITE SKN 172**“, čije se karakteristike mogu vidjeti u tabeli 2. Ovo staklo karakteriše velika transparentnost ($TL=0.67$) i mala refleksija ($R_l=9$), što omogućava ostvarivanje pomenutih efekata. Usvojeni tip stakla ima značajnu vrijednost solarnog faktora ($g=0.40$) jer staklena fasada sa slike 5. nije okrenuta direktno prema jugu i ne postoji mogućnost pregrijavanja prostora u ljetnjem periodu. Selektivnost izabranog tipa stakla $S=1.68$ je prilično dobra, s obzirom na njegovu značajnu transparentnost.



Slika 5. Prikaz objekta izvedenog od stakla tipa **SGG COOL-LITE SKN 172** [12]
Figure 5. Presentation of the building made of the type of glass **SGG COOL-LITE SKN 172** [12]

Konačni izbor stakla će, na kraju, zavisiti od željenog cilja arhitektonskog projekta, vrste i lokacije objekata i tehnoloških mogućnosti, karakteristika i performansi stakla koje su na raspolaganju, kao i od ekonomske analize različitih cijena stakala, koja će projektantu omogućiti izbor optimalnog rješenja.

Korisno je napomenuti da ukoliko projektant želi stakla sa velikom propustljivošću svjetlosnih zraka, problem pretjeranog sunčevog zračenja u ljetnjem periodu može riješiti vještačkim zazorima, pa će samim tim i izbor stakla biti različit. Pojedini proizvođači nude rješenje u vidu zazora sa koncentričnim prizmama, čijim

light reflection is lower than in the previous type of glass. Solar factor is considerably higher than in previously described types, which indicates that this type of glass enables higher glass transparency, and it has higher value of solar factor, which is very important, particularly when higher energy efficiency in architectural solutions is to be achieved (with higher solar factor, glass transmission is lower, as well as energy losses).

In Figure 5 it is presented the example of glass selection where architectural solution requires higher transparency of the interior looking at the building from the outside. The author of the project wished to emphasize the elements of the supporting structure and make the interior visible to the observers outside the building, so that they can see better the surroundings. Basically, better connection between the interior and the surroundings is desired. In order to achieve these effects the designer used the glass type “**SGG COOL-LITE SKN 172**”, which characteristics can be seen in Table 2. This glass is characterized by high transparency ($TL=0.67$) and small reflection ($R_l=9$), which enables the realization of the named factors. The used type of glass has significant value of solar factor ($g=0.40$) because the glass facade in Figure 5 does not face directly south and there is no possibility of overheating of the space during summer. The selectivity of the chosen type of glass $S=1.68$ is quite good, considering its significant transparency.

The final choice of glass will finally depend on the desired objective of the architectural project, type and location of the building, technological possibilities, characteristics and performances of available glass, as well as on the economic analysis of different prices of glass which will enable the selection of optimal solution for the designer.

It is useful to mention that, unless the designer wants glasses with high permeability of light rays, the problem of excessive solar radiation in summer can be solved by artificial clearances; therefore the selection of glass itself will be different. Certain manufacturers offer the solution

radom se može softverski upravljati, tako da u zimskom periodu ulazi toplota u prostor, a u ljetnjem periodu samo u planiranom obimu^{(11), (12)}.

Česti su zahtjevi da izbor stakla zavisi i od stepena refleksije (uglavnom kad arhitektonskih rješenja gdje se na staklenoj fasadnoj površini želi imati odsjaj objekata u okruženju- jezgra starih gradova, gradski trgovi idr.). U ovom slučaju prednost se daje staklu koje ima ovu osobinu u odnosu na transparentnost, karakteristike solarnog faktora pri izboru tipa stakla.

Arhitektonska rješenja na fasadi često zahtijevaju primjenu različitih vrsta stakla, ali izbor mora biti u skladu sa solarnim karakteristikama stakla, tj. da gubici energije budu što manji i usaglašeni sa zakonskom regulativom iz ove oblasti.

Kada se kod izrade fasada predvodi staklo u boji koje nije transparentno, kao dekorativni materijal, ispod njega se postavlja nezavisna teremička izolacija, tako da u tom slučaju transmisija i solarni faktor nijesu bitni, već samo kvalitet proizvoda i mehaničke karakteristike.

5 ZAKLJUČAK

Nijedan građevinski materijal nije toliko tehnološki napredovao kod izgradnje objekata visokogradnje, kao staklo. Veoma je mali broj savremenih arhitektonskih objekata kod kojih staklo nije značajno zastupljeno. Istraživanje karakteristika stakla je jako interesantno i sa stanovišta toplotnih gubitaka na objektima, koji su po pravilu najveći na fasadnim elementima koji su obrađeni od stakala. Ipak jedan broj arhitekata nije detaljno upućen u najnovije tehnološke mogućnosti stakla, u mogućnost izbora osnovnih karakteristika, boja, transmisije, solarnog faktora, mehaničkih karakteristika, programiranog mijenjanja svojstava i dr. Stoga je i cilj ovog rada bio da se promoviše ova veoma interesantna oblast, jer se adekvatnim izborom staklenih fasadnih elemenata može značajno doprinijeti većoj energetskoj efikasnosti objekata visokogradnje, što je veoma značajno i sa stanovišta smanjenja emisije štetnih gasova i efekta staklene bašte, s obzirom na veliki obim utroška energije koju koristi ova vrsta objekata u eksploataciji.

6 LITERATURA REFERENCES

- [1] Bitimir, Jelenka, Konstrukcija aluminijskih fasada, ALPRO, Vlasenica, 2006.
- [2] Brookes, Alen J.Pol, Dominique, Inovation in Architecture, Spon Press, New Zork, 2004.
- [3] Jasna Čikić, Staklo i konstruktivna primjena u arhitekturi, Građevinska knjiga, Beograd, 2007.
- [4] Žegarac, B i dr. , Savremene fasade obložene kamenom i staklom, Beograd, 1997. ,1995.
- [5] Lyons,Arthur, Materials for Architecture and Builders, Oxford, 2002.
- [6] Michell Addington and Daniel Schodek, Smart Materials and Technologies for the architecture and desines professions, London, 2006.

in the form of clearance with concentric prisms, which operation can be controlled by software, so that in winter the heat enters the space, and in summer only in planned amount ^{(11), (12)}.

The demands for the glass selection on the basis of reflection grade are often (mostly for architectural designs where on a glass facade surface the reflection of the surrounding buildings is desired – core of old cities, city squares etc.) In this case the priority is given to the glass with this property regarding the transparency and solar factor characteristics in the selection of the type of glass.

The architectural designs on the facade often require the use of different types of glass, but the selection has to be in accordance with solar characteristic of the glass i.e. the energy losses should be smaller and coordinated with law regulations in this field.

When non-transparent coloured glass is predicted for façade design as decorative material, the independent thermal isolation is set below. In that case the transmission and solar factor are not important, but the quality of the product and its mechanical characteristics.

5 CONCLUSION

None of the building materials advanced technologically in building construction as glass did. There is a very small number of modern architectural buildings where glass is not significantly present. The investigation of the glass characteristics is very interesting from the aspect of heat losses of the buildings, which by the rule are highest in the façade elements made of glass. However, a number of architects are not well informed about the technological possibilities of glass, the possibility of the selection of its basic characteristics such as colours, transmission, solar factor, mechanical characteristics, programmed change of properties etc. Therefore the aim of this paper was to promote this very interesting area, because the appropriate selection of glass façade elements can give important contribute to better energy efficiency of the buildings, which is very important from the aspect of harmful gases reduction and greenhouses, considering high energy consumption used for these buildings in exploitation.

- [7] Victoria Ballard with Patrick Rand, Materials for Architectural design, New York, 2006.
- [8] Nijse, Rob, Glass in Structure, Basel, 2003.
- [9] Robinson. G. Building Your Own Wizard User Interface- Toolshed, Gr-Fx Pty Limited, Australia, 2000,
- [10] Rice Peter, Dutton Hugh, Structural Glass, London, 1995.
- [11] Schittich, Staib, Balkow, Schuller, Sobek, Glass Construction Manual, Berlin, 1999.
- [12] Glass Guide, Prospoktni material kompanije kompanije, Saint-Gobain Glass, Milan, 2000.

REZIME

ENERGETSKA EFIKASNOST I TEHNOLOGIJE PRIMJENE STAKLA U ARHITEKTONSKOM PROJEKTOVANJU

Ratko MITROVIĆ

U radu je dat prikaz mogućnosti primjene stakla u projektovnju i izgranji objekata visokogradnje, u funkciji energetske efikasnosti. S obzirom na obimnost i kompleksnost ove materije, prikazani su samo osnovni elementi ovih tehnologija koje projektant treba da zna kod izrade arhitektonskih projekata. Dat je i prikaz široke lepeze mogućnosti primjene stakla kod projektovanja energetski efikasnih objekata visokogradnje. Na konkretnom primjeru je prikazana metodologija izbora stakla za ostvarivanje željenih arhitektonskih rješenja. U zaključku rada su date preporuke, tendencije razvoja i naglašen značaj poznavanja tehnološkog razvoja stakla u projektovanju savremenih arhitektonskih projekata.

Ključne riječi: energetska efikasnost, tehnologije, staklo, materijali

SUMMARY

ENERGY EFFICIENCY AND GLASS TECHNOLOGY USED IN ARCHITECTURAL DESIGNS

Ratko MITROVIC

The paper presents the possibility of glass use in design and building construction as a function of energy efficiency. Considering the volume and complexity of the matter, only basic elements of these technologies, which should be known to the designer for architectural projects, are presented. High variety of possibilities of glass use in the design of energetically efficient building constructions is presented. The concrete examples demonstrate the methodology of glass selection for realization of the desired architectural solutions. The conclusion presents recommendations, as well as development tendencies and emphasized importance of the knowledge of technological development of glass in the design of contemporary architectural projects.

Key words: energy efficiency, technology, glass, materials.

UPUTSTVO AUTORIMA*

Prihvatanje radova i vrste priloga

U časopisu Materijali i konstrukcije štampaće se neobjavljeni radovi ili članci i konferencijska saopštenja sa određenim dopunama ili bez dopuna, prema odluci Redakcionog odbora, a samo izuzetno uz dozvolu prethodnog izdavača prihvaćaju se i objavljeni rad. Vrste priloga autora i saradnika koji će se štampati su: originalni naučni radovi, prethodna saopštenja, pregledni radovi, stručni radovi, konferencijska saopštenja (radovi sa naučno-stručnih skupova), kao i ostali prilozi kao što su: prikazi objekata i iskustava - primeri, diskusije povodom objavljenih radova i pisma uredništvu, prikazi knjiga i zbornika radova, kao i obaveštenja o naučno-stručnim skupovima.

Originalni naučni rad je primarni izvor naučnih informacija i novih ideja i saznanja kao rezultat izvornih istraživanja uz primenu adekvatnih naučnih metoda. Dobijeni rezultati se izlažu kratko, jasno i objektivno, ali tako da poznavalac problema može proceniti rezultate eksperimentalnih ili teorijsko numeričkih analiza i tok razmišljanja, tako da se istraživanje može ponoviti i pri tome dobiti iste ili rezultate u okvirima dopuštenih odstupanja, kako se to u radu navodi.

Prethodno saopštenje sadrži prva kratka obaveštenja o rezultatima istraživanja ali bez detaljnih objašnjenja, tj. kraće je od originalnog naučnog rada. U ovu kategoriju spadaju i diskusije o objavljenim radovima ako one sadrže naučne doprinose.

Pregledni rad je naučni rad koji prikazuje stanje nauke u određenoj oblasti kao plod analize, kritike i komentara i zaključaka publikovanih radova o kojima se daju svi neophodni podaci pregledno i kritički uključujući i sopsvene radove. Navode se sve bibliografske jedinice korišćene u obradi tematike, kao i radovi koji mogu doprineti rezultatima daljih istraživanja. Ukoliko su bibliografski podaci metodski sistematizovani, ali ne i analizirani i raspravljani, takvi pregledni radovi se klasifikuju kao stručni pregledni radovi.

Stručni rad predstavlja koristan prilog u kome se iznose poznate spoznaje koje doprinose širenju znanja i prilagođavanja rezultata izvornih istraživanja potrebama teorije i prakse. On sadrži i rezultate razvojnih istraživanja.

Konferencijsko saopštenje ili rad sopsšten na naučno-stručnom skupu koji mogu biti objavljeni u izvornom obliku ili ih autor, u dogovoru sa redakcijom, bitno preradi i proširi. To mogu biti naučni radovi, naročito ako su sopsštenja po pozivu Organizatora skupa ili sadrže originalne rezultate prvi put objavljene, pa ih je korisno uz određene dopune učiniti dostupnim široj stručnoj javnosti. Štampaće se i stručni radovi za koje Redakcioni odbor oceni da su od šireg interesa.

Ostali prilozi su prikazi objekata, tj. njihove konstrukcije i iskustava-primeri u građenju i primeni različitih materijala, diskusije povodom objavljenih radova i pisma uredništvu, prikazi knjiga i zbornika radova, kao i obaveštenja o naučno-stručnim skupovima.

Autori uz rukopis predlažu kategorizaciju članka. Svi radovi pre objavljivanja se recenziraju, a o prihvatanju za publikovanje o njihovoj kategoriji konačnu odluku donosi Redakcioni odbor.

Da bi se ubrzao postupak prihvatanja radova za publikovanje, potrebno je da autori uvažavaju Uputstva za pripremu radova koja su navedena u daljem tekstu.

Uputstva za pripremu rukopisa

Rukopis otkucati jednostrano na listovima A-4 sa marginama od 31 mm (gore i dole) a 20 mm (levo i desno), u Wordu fontom Arial sa 12 pt. Potrebno je uz jednu kopiju svih delova rada i priloga, dostaviti i elektronsku verziju na navedene E-mail adrese, ili na CD-u. Autor je obavezan da čuva jednu kopiju rukopisa kod sebe zbog eventualnog oštećenja ili gubitka rukopisa.

Od broja 1/2010, prema odluci Upravnog odbora Društva i Redakcionog odbora, radovi sa pozitivnim recenzijama i prihvaćeni za štampu, publikovaće se na srpskom i engleskom jeziku.

Svaka stranica treba da bude numerisana, a optimalni obim članka na jednom jeziku, je oko 16 stranica (30000 slovnih mesta) uključujući slike, fotografije, tabele i popis literature. Za radove većeg obima potrebna je saglasnost Redakcionog odbora.

Naslov rada treba sa što manje reči (poželjno osam, a najviše do jedanaeset) da opiše sadržaj članka. U naslovu ne koristiti skraćenice ni formule. U radu se iza naslova daju ime i prezime autora, a titule i zvanja, kao i ime institucije u podnožnoj napomeni. Autor za kontakt daje telefone, faks i adresu elektronske pošte, a za ostale autore poštansku adresu.

Uz sažetak (rezime) od oko 150 do 200 reči, na srpskom i engleskom jeziku daju se ključne reči (do deset). To je jezgrovit prikaz celog članka i čitaocima omogućuje uvid u njegove bitne elemente.

Rukopis se deli na poglavlja i potpoglavlja uz numeraciju, po hijerarhiji, arapskim brojevima. Svaki rad ima uvod, sadržinu rada sa rezultatima, analizom i zaključcima. Na kraju rada se daje popis literature.

Kod svih dimenzionalnih veličina obavezna je primena međunarodnih SI mernih jedinica.

Formule i jednačine treba pisati pažljivo vodeći računa o indeksima i eksponentima. Autori uz izraze u tekstu definišu simbole redom kako se pojavljuju, ali se može dati i posebna lista simbola u prilogu.

Prilozi (tabele, grafikoni, sheme i fotografije) rade se u crno-belom tehničkom, u formatu koji obezbeđuje da pri smanjenju na razmere za štampu, po širini jedan do dva stupca (8cm ili 16.5cm), a po visini najviše 24.5cm, ostanu jasni i čitljivi, tj. da veličine slova i brojeva budu najmanje 1.5mm. Originalni crteži treba da budu kvalitetni i u potpunosti pripremljeni za presnimavanje. Mogu biti i dobre, oštre i kontrastne fotokopije. Koristiti fotografije, u crno-belom tehničkom, na kvalitetnoj hartiji sa oštrim konturama, koje omogućuju jasnu reprodukciju. Skraćenice u prilogima koristiti samo izuzetno uz obaveznu legendu. Prilozi se posebno označavaju arapskim brojevima, prema redosledu navođenja u tekstu. Objašnjenje tabele daje se u tekstu.

Potrebno je dati spisak svih skraćenica korišćenih u tekstu.

U popisu literature na kraju rada daju se samo oni radovi koji se pominju u tekstu. Citirane radove treba prikazati po azbučnom redu prezimena prvog autora. Literaturu u tekstu označiti arapskim brojevima u uglastim zagradama, kako se navodi i u Popisu citirane literature, napr [1]. Svaki citat u tekstu mora se naći u Popisu citirane literature i obrnuto svaki podatak iz Popisa se mora navesti u tekstu.

U Popisu literature se navode prezime i inicijali imena autora, zatim potpuni naslov citiranog članka, iza toga sledi ime časopisa, godina izdavanja i početna i završna stranica (od - do). Za knjige iza naslova upisuje se ime urednika (ako ih ima), broj izdanja, prva i poslednja stranica poglavlja ili dela knjige, ime izdavača i mesto objavljivanja, ako je navedeno više gradova navodi se samo prvi po redu. Kada autor citirane podatke ne uzima iz izvornog rada, već ih je pronašao u drugom delu, uz citat se dodaje «citirano prema...». Neobjavljeni članci mogu se pominjati u tekstu kao «usmeno saopštenje».

Autori su odgovorni za izneseni sadržaj i moraju sami obezbediti eventualno potrebne saglasnosti za objavljivanje nekih podataka i priloga koji se koriste u radu.

Ukoliko rad bude prihvaćen za štampu, autori su dužni da, po uputstvu Redakcije, unesu sve ispravke i dopune u tekstu i prilogima.

Za detaljnija tehnička uputstva za pripremu rukopisa autori se mogu obratiti Redakcionom odboru časopisa.

Rukopisi i prilozi objavljenih radova se ne vraćaju. Sva eventualna objašnjenja i uputstva mogu se dobiti od Redakcionog odbora.

Radovi se mogu slati i na e-mail: folic@uns.ac.rs ili miram@uns.ac.rs

* Uputstvo autorima je modifikovano i treba ga, u pripremi radova, slediti.

Izdavanje časopisa "Materijali i konstrukcije" finansijski su pomogli:



INŽENJERSKA KOMORA SRBIJE

**MINISTARSTVO ZA NAUKU I TEHNOLOŠKI
RAZVOJ SRBIJE**



**UNIVERZITET U BEOGRADU
GRAĐEVINSKI FAKULTET**



**DEPARTMAN ZA GRAĐEVINARSTVO
FAKULTET TENHIČKIH NAUKA NOVI SAD**



INSTITUT IMS AD, BEOGRAD



**UNIVERZITET CRNE GORE
GRAĐEVINSKI FAKULTET - PODGORICA**