



2009.
GODINA
LII



MATERIJALI 2 I KONSTRUKCIJE

MATERIALS AND STRUCTURES

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



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-Čurčić, 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 TODOROVIĆ

NASLOVNA STRANA:

Ispitivanje statičkog modula elastičnosti i Poasonovog
koeficijenta na kernu izvađenom iz betona gravitacione
brane »Zvornik« prema ASTM C 469 – 94

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, Vrnjaska 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 Miloša 9
Telephone: 381 11/3242-589

REVIEWERS:

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

TECHNICAL EDITOR:

Stoja TODOROVIĆ

COVER:

Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio Examination on
Core Sample, Obtained From Concrete of Gravitational Dam
»Zvornik«, According to ASTM C 469 – 94

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

Zvonko TOMANOVIĆ OČVRŠĆAVANJE MEKE STIJENE NAKON DUGOTRAJNOG PRITISKA I OMEKŠANJE POD DEJSTVOM CIKLUČNOG OPTEREĆENJA Originalni naučni rad	3
Radmila SINĐIĆ-GREBOVIĆ PRORAČUN SMIČUĆE NOSIVOSTI GREDA OD BETONA VISOKE ČVRSTOĆE Originalni naučni rad	17
Dragica JEVTIĆ Dimitrije ZAKIĆ EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA ODREĐENIH TERMO-FIZIČKIH I MEHANIČKIH SVOJSTAVA EPS BETONA Stručni rad	35
Uputstvo autorima	46

CONTENTS

Zvonko TOMANOVIĆ SOFT ROCK HARDENING AFTER THE LONG- TERM COMPRESSION AND SOFTENING AFTER CYCLIC LOAD Original scientific paper	3
Radmila SINĐIĆ-GREBOVIĆ PREDICTION OF SHEAR STRENGTH IN HIGH- STRENGTH CONCRETE BEAMS Original scientific paper	17
Dragica JEVTIĆ Dimitrije ZAKIĆ EXPERIMENTAL TESTING OF CERTAIN THERMO- PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF EPS CONCRETE Professional paper	35
Preview Report	46

OČVRŠĆAVANJE MEKE STIJENE NAKON DUGOTRAJNOG PRITISKA I OMEKŠANJE POD DEJSTVOM CIKLUČNOG OPTEREĆENJA

SOFT ROCK HARDENING AFTER THE LONG-TERM COMPRESSION AND SOFTENING AFTER CYCLIC LOAD

Zvonko TOMANOVIĆ

ORIGINALNI NAUČNI RAD
UDK: 552.1:691.21 = 861

1 UVOD

Najveći broj istraživanja vezanih za ponašanje stijene pod dugotrajnim opterećenjem pri sobnim temperaturama izvedeno je na uzorcima kamene soli (Wallner, 1983; Cristescu, 1988; Doring and Kiehl 1996; Cristescu & Hunsche, 1998; Keihl and Reim, 1998). Postoji daleko manji broj publikovanih eksperimentalnih rezultata dobijenih na laporcu ili sličnim stijenama koje karakterišu značajne deformacije puzanja (Kharchafi and Descoedres, 1995; Bergues i drugi, 1998; Tomanović, 2007). Ovakvi stijenski materijali prestvaljaju realnu radnu sredinu pri izvođenju velikog broja podzemnih objekata. Određivanje materijalnih karakteristika meke stijene od izuzetne je važnosti u mehanici stijena, i igra jednu od esencijalnih uloga u karakterizaciji ponašanja mekih stijena i njihovog numeričkog modeliranja.

U cilju formulisanja reološkog modela meke stijene, izvedeni su testovi puzanja na uzorcima laporca. Testovi su izvedeni na jednoosijalnim, bikasijalnim i triaksijalnim uzorcima u trajanju od 7 dana do jedne godine. Nakon nanošenja opterećenja na jednoosijalne prizmatične uzorke u trajanju od 6 mjeseci izvršeno je njihovo rasterećenje. Nakon rasterećenja ostavljeno je dovoljno vremena da se oslobodi najveći dio povratne deformacije i nakon toga je ponovo nanoseno opterećenje, ali na većem nivou napona od prethodnog.

U ovom radu se prezentuju rezultati jednoosijalnih testova puzanja na prizmatičnim uzorcima dimenzija 15x15x40cm. Uticaj predhodnog dugovremenskog opterećenja u toku testa puzanja je evidentan na veličinu kratkotrajnih deformacija, ali i na dalji tok puzanja tj. na

Zvonko Tomanović
Univerzitet Crne Gore
Građevinski fakultet
Cetinjski put bb, Podgorica
E-mail: zvonko@ac.me

1 INTRODUCTION

Most of research referring to rock behaviour in conditions of long-term loading at room temperature, published worldwide so far, have been carried out on the samples of rock salt (Wallner, 1983; Cristescu, 1988; Doring and Kiehl 1996; Cristescu & Hunsche, 1998; Keihl and Reim, 1998). There are very few published experimental results carried out on marl or similar rocks characterized by significant creep deformations (Kharchafi and Descoedres, 1995; Bergues et al, 1998; Tomanovic, 2007). This kind of material represents a real environment under which many underground structures are constructed. The reliable determination of material properties of soft rocks is of paramount importance in rock mechanics, as this plays an essential role in characterising the mechanical behaviour of soft rocks and numerical modelling of it.

In order to define rheological model of soft rock, creep tests have been conducted on specimens of marl. Testing has been carried out on uniaxial, biaxial and triaxial specimens in duration of 7 days up to one year. After six months of loading on the uniaxial prismatic specimen, sample has been unloaded during creep test. Sufficient time was allowed for relaxation of deformations, followed by loading but at the higher stress level.

Results of tests on the uniaxial loaded prismatic specimens with dimensions 15x15x40 cm are presented in this work. The influence of initial stresses on deformation response of marl is evident at the short-term loading, but also has influence on further process of creep

Zvonko Tomanović
University of Montenegro
Faculty of Civil Engineering
Cetinjski put bb, Podgorica
E-mail: zvonko@ac.me

vremenski zavisne deformacije. Rezultati ukazuju da opterećenje aplicirano u toku dugog vremenskog perioda i veći naponski nivo imaju veći uticaj na očvršćavanje materijala.

2 TOK I REZULTATI TESTOVA NA LAPORCU

Predmet istraživanja su naponsko-deformacijsko ponašanje stijene oko podzemnog otvora u uslovima dugotrajnog opterećenja. Centralni dio istraživanja su zauzela laboratorijska eksperimentalna istraživanja puzanja na uzorcima laporca, uzetim iz otvorenog kopa rudnika uglja u Pljevljima (sjeverni dio Crne Gore), kao izabrane reprezentativne stijene iz grupe mekih stijena. Laboratorijski testovi su izvedeni u uslovima kratkotrajnog i dugotrajnog opterećenja i rasterećenja pri jednoosijalnom, biaksijalnom i osno simetričnom triaksijalnom stanju napona. Finalni cilj je bio definisanje uticaja naponskog stanja na deformacijsko ponašanje testiranog materijala.

Ispitivani laporac prema hemijskom sastavu sadrži CaCO_3 u granicama 48.10-48.30%, dok je sadržaj nerastvornog ostatka (glinovito+kvarc) u granicama 51.03-51.87%. U pogledu mineralološkog sastava dominantne mineralne faze predstavljaju kalcit (46-48%) i kvarc (12-13%), dok su u okviru glinovite faze ilit+smektit, montmorilonit, kaolinit, glaukonit, transformisani feldspat i liskun. Vlažnost uzoraka se kretala od 8-11%, a jednoosijalna čvrstoća materijala oko $\sigma_c = 8.8 \text{ MPa}$ (Tomanović, 2007) [8].

2.1 Efekti promjene vlage i temperature

Laporac nakon vađenja iz prirodno vlažne sredine, na sobnoj temperaturi, brzo gubi vlagu. Zbog značajnog sadržaja glinovitih minerala i velike poroznosti gubitak vlage u uzorcima ima za posledicu skupljanje materijala. Pri intenzivnom sušenju i višem stepenu gubitka vlage skupljanje uzrokuje pojavu pukotina i raspadanje materijala. Imajući u vidu cilj istraživanja, bilo je neophodno deformacije koje se javljaju kao posledica gubitka vlage svesti na prihvatljiv nivo, kako ne bi imale uticaj na mehaničke karakteristike materijala.

Sa druge strane, pri testu puzanja, deformacije skupljanja koje nastaju kao posledica promjene vlage predstavljaju nepoželjnu pojavu. Radi redukovanja promjene vlažnosti u toku testa puzanja na uzorak je, nakon postavljanja mjernih baza (pločica), nanošen tanak sloj parafina. Parafin je zagrijavan do temperature koja je omogućavala da se na uzorak nanosi četkom, kako je to prikazano na fotografiji, sl.1. Promjena vlage ovom mjerom je znatno prigušena, a još značajnije smanjena je brzina promjene vlage, pa je skupljanje stijenskog materijala u toku perioda ispitivanja od godinu dana, svedeno na prihvatljiv nivo. Parafinirani uzorci i nakon godinu dana od početka testa nijesu pokazivali makroskopske prsline, što se redovno dešavalo sa nezaštićenim uzorcima u mnogo kraćem periodu. Ovako definisan test, omogućava da se ukupna deformacija smatra dominantno posledicom naponske promjene u materijalu, dok su ostale komponente ukupne deformacije znatno manje.

deformation i.e. on time dependent deformations. Overall, the results show that if the load is applied over longer period of time and the stress intensity is higher, than there is more significant effects on hardening of material.

2 PROCESS OF CONDUCTED TESTS OF MARL CREEP

The subject of this research was stress-strain (deformation) behaviour of rock around the underground openings at long-term loading. Central part of research are the laboratory experiments on creep of the marl samples, taken from the uncover of the coal mine "Pljevlja" (north part of Montenegro), as the chosen representative rock from the group of soft rocks. Laboratory tests are carried out under the influence of short-term and long-term loading and unloading in the conditions of uniaxial, biaxial and triaxial symmetrical stress state, where the final goal was defining the stress state influence on deformation behaviour of tested material.

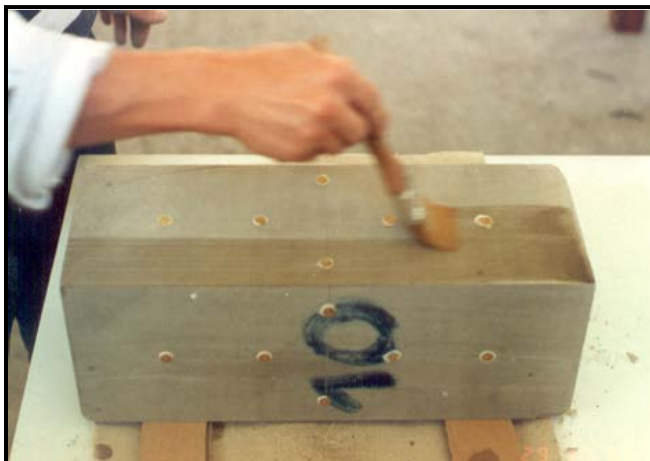
Tested marl according in its chemical contents contains CaCO_3 in limits 48.10-48.30%, while the contents of insoluble rest (clayey+quartzite) is in limits 51.03-51.87%. Regarding the mineralogical contents, calcite (46-48%) and quartz (12-13%) represent dominant mineral phases, while in clayey phase there are illite and smectite, montmorillonite, kaolinite, glauconite, transformed feldspar and mica. Moisture of the sample was from 8-11%, and uniaxial strength of the material was about $\sigma_c = 8.8 \text{ MPa}$ (for details see Tomanovic, 2007) [8].

2.1. Effects of change of moisture and temperature

After being taken out from the naturally humid environment, marl loses its moisture very fast in room temperature. Due to a significant contents of clay minerals and huge porosity, specimens moisture loss results in shrinking of the material. At the event of intensive drying and higher moisture loss, shrinking causes occurrence of cracks and disintegration of the material. Having in mind purpose of the research, it was necessary to reduce deformations which occur as a consequence of moisture loss to the acceptable level, so that they do not impact mechanical characteristics of the material.

On the other hand, during the creeping test, shrinking deformations which occur as the consequence of the change of moisture represent the undesirable phenomenon. In order to reduce change of moisture during creeping test, a thin layer of paraffin was put on the specimen after the measuring bases (nodes) were placed. Paraffin was heated to the temperature which allowed its application on the specimen by brush as shown in the photograph, Figure 1. Change of moisture was significantly suppressed by application of this measure and what is more important dynamics of change of moisture was reduced, and shrinking of rock material during the period of examination which lasted for a year, was reduced to acceptable level. Paraffined specimens a year after the beginning of the test did not show macroscopic cracks, which used to happen

I pored mjera za minimiziranje promjene vlage, u toku dugog vremenskog perioda javljaju se određene deformacije skupljanja, a posebno dilatacije uzrokovane promjenom temperature. Ove deformacije su posebno mjerene na identično pripremljenim, ali neopterećenim uzorcima. Mjerenjem deformacija neopterećenih uzoraka (istovremeno sa testom puzanja) izmjerene su sve promjene na materijalu koje nisu posledica naponske promjene. Imajući u vidu navedeno, rezultati mjerenja deformacija pri testu puzanja su korigovani za uticaj promjene temperature i skupljanja uzorka u toku vremena.



Slika 1. Zaštita uzorka parafinom
Figure 1. Protection of specimens by paraffin

2.2 Rezultati testova provedenih u uslovima kratkotrajnog opterećenja

Testove provedene u uslovima kratkotrajnog opterećivanja generalno karakteriše kratko vrijeme trajanja testa (nekoliko minuta do nekoliko sati, ređe duže) pri čemu su deformacije uzorka – materijala, koji se testira, dominantno posledica naponske promjene. Zbog toga trajanje nanošenja opterećenja, odnosno brzina opterećivanja, treba da bude dovoljno velika da se u analizi mogu zanemariti inercijalne sile, a sa druge strane trajanje nanošenja opterećenja mora biti dovoljno kratko da se u toku testa ne razviju vremenski zavisne deformacije ispitivanog materijala.

Ukupna deformacija stijene, kao što je laporac, može biti indukovana promjenom napona i temperature, promjenom vlage, vremenski zavisnim deformacija i td, pa ovako definisan test, u uslovima kratkotrajnog opterećenja, omogućava da se ukupna deformacija smatra dominantno posledicom naponske promjene u materijalu, dok su ostale komponente ukupne deformacije zanemarive.

Jednoaksijalni test na cilindričnim ili prizmatičnim uzorcima, pri nespriječnom bočnom širenju, kao najjednostavniji za izvođenje i interpretaciju obično predstavlja početni korak pri istraživanju naponsko-deformacijskog ponašanja čvrstih materijala. Iako sa vrlo jednostavnim poljem napona i deformacija, ovaj test daje vrlo jasne materijalne konstante i/ili parametre koji se mogu vrlo korisno upotrebiti i pri analizi vrlo složenih naponsko

regularly with unprotected specimens in much shorter period of time. Test, defined in this way, enables that entire deformation is considered predominantly a consequence of the stress change in the material, while other components of the total deformation are significantly lower.

Apart from the measures for minimizing of change of moisture, during a long period of time, certain shrinking deformations occur, particularly strains caused by change of temperature. These deformations are separately measured on identically prepared but unloaded specimens. By measurement of deformations of unloaded

of unloaded specimens (simultaneously with creeping test) all the changes on the material were measured which are not the consequence of the stress change. Given the above mentioned, the results of measurement of deformations during the creeping test were corrected in terms of impact of the change of temperature and shrinking of specimens during time.

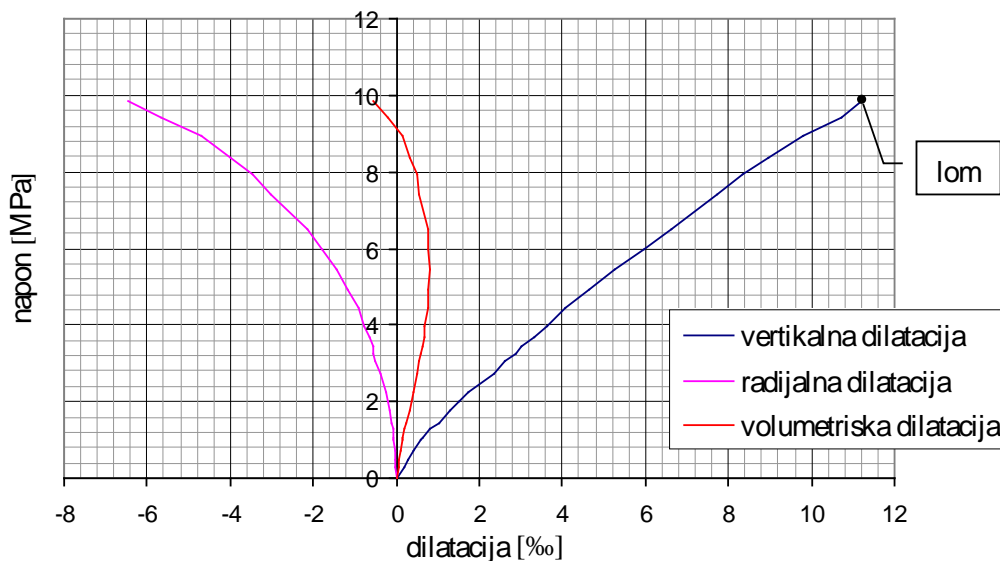
2.2 Results of tests conducted under of short loading

Tests conducted in conditions of short loading are generally characterized by short duration of tests (several minutes to several hours, it is rarely longer) where deformations of specimens - tested materials are predominantly the result of stress change. Due to that duration of the process of loading, that is, loading rate should be sufficiently long so that inertial forces can be neglected in the analysis, and on the other hand duration of the process of loading has to be short enough so as to prevent development of time dependent deformations of tested materials.

Complete deformation of rock, such as marl, can be induced by changes of stress and temperature, change of humidity, time dependent deformations etc, and test defined in this manner under loading provide that the whole deformation is predominantly seen as the consequence of stress change in the material while other components of the whole deformation are not taken into consideration.

zavisnih fenomena.

Ispitivani uzorci laporca pokazuju nelinearnu vezu između napona i deformacija ovog materijala čak i pri malom nivou napona (sl.2). Na sl. 2. je prikazan reprezentativan $\sigma - \varepsilon$ dijagram laporca, dobijen u jednoosijalnom testu na cilindričnim uzorcima dimenzija $h/d=10.8/5.4$ cm. Uzorci su opterećivani jednoosijalno, u pravcu ose cilindra, u inkrementima od 1.0MPa. Deformacije su mjerene u podužnom i poprečnom pravcu kako bi bilo moguće definisati *Poisson-ov* koeficijent materijala. Pri svakom inkretnetu sile deformacije su mjerene jedan minut nakon nanošenja opterećenja. Brzina opterećivanja je oko 3-4 minuta po inkretnetu, tako da je uzorak dovođen do loma za oko 30 minuta.



Slika 2. Dijagram napona-deformacija pri jednoosijalnom testu na laporcu uz kontrolisanu silu (cilindrični uzorak $h/d=10.8/5.4$ cm)

Figure 2. Diagram of stress – strains in uniaxial test perform on marl with controlled force (cylindrical specimen $h/d=10.8/5.4$ cm)

2.3 Procedura testa puzanja jenoosijalano opterećenih uzoraka

Jednoosijalni test puzanja laporca u eksperimentalnom istraživanju koje se prezentuje proveden je u tri faze na po dvije grupe po tri prizmatična uzorka dimenzija $15 \times 15 \times 40$ cm. (Ovoj glavnoj grupi uzoraka-testova prehodila je probna "nulta" serija od šest uzoraka na kojima je izveden test puzanja u toku tri mjeseca za testiranje mjerne tehnike i dobijanje preliminarnih vrednosti mjenjenih veličina.) Za opterećivanje i "čuvanje" sile u toku vremena korišćen je uređaj sa "mrtvim" opterećenjem i sistemom poluga, sl. 3. Svaki uređaj je opremljen prstenastim mjeračima sile (konstruisanim od autora ovog rada) koji su obezbjeđivali da varijacije sile na uzorak u toku testa budu manje od 0.3%.

Tok testa za obje grupe uzoraka je prikazan na dijagramu deformacija-vrijeme i napon-vrijeme, sl.4. Test je proveden u tri faze: opterećivanje, rasterećenje i ponovno opterećenje, na veći nivo napona, uz održavanje konstantnog napona nakon naponskih promjena. Opterećivanje uzoraka je vršeno u inkrementima od 25%, od definisanog nivoa napona za test puzanja, za

Uniaxial tests on cylindrical or prismatic specimens, during free lateral expanding, as the most simple tests in terms of performance and interpretation, usually represents initial step in testing of stress-deformation behavior of solid materials. Even though it includes very simple field of stress and deformations, this test results with very clear material constants and/or parameters which can be used in a productive manner even for the analysis of very complex stress dependent phenomena.

Tested marl specimens show non-linear relation between stress and deformations of this material even under low level of stress (fig.2). Figure 2 shows representative $\sigma - \varepsilon$ marl diagram resulting from uniaxial test perform on cylindrical specimens $h/d=10.8/5.4$ cm.

Specimens were loaded uniaxially in direction of cylinder axis in 1.0MPa increments. Strains were measured in horizontal and vertical direction so as to enable definition of *Poisson's* coefficient of material. In the case of every single force increment, strains were measured one minute after loading. Loading rate was about 3-4 minutes per increment and specimen was brought to breakage for about 30 minutes.

2.3 Uniaxial creep tests procedure

Uniaxial tests of marl creep in the experimental research presented in this paper, was carried out in three phases, on two groups each one consisting of three prismatic samples whose dimensions were $15 \times 15 \times 40$ cm. (This main group of specimens-tests was preceded by a pilot "zero" series of six samples on which the creep test was carried out for three months in order to test measurement technique and to obtain preliminary results of measured values). Device with "dead" load and system of bars is used for loading and "keeping" the force over time, which is presented in Figure 3. Each

svaku grupu uzoraka. Opterećivanje svakog pojedinačnog uzorka je trajalo oko jedan sat. Nakon dostizanja definisanog nivoa napona za test puzanja (2.0 ili 4.0MPa, što je oko 25% i 50% od jednoosijalne čvrstoće ispitivanog laporca) uzorci su čuvani pod konstantnim naponom narednih 180 dana, što čini prvu fazu testa puzanja.

device is equipped with "ringlike" load cells (constructed by the author of this paper), which provided that variations of force on the sample during the test are less than 0.3%.

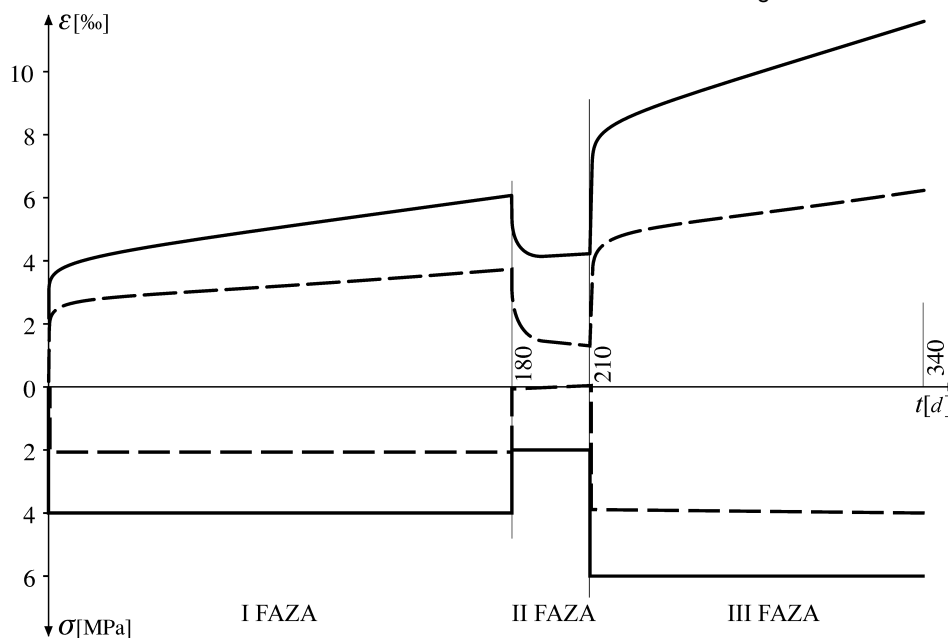
The test procedure carried out on samples is presented in deformation-time and stress-time curves; Figure 4. The test was conducted in three phases:



Slika 3. Uređaj za jednoosijalno opterećivanje pri testu puzanja
Figure 3. Device for uniaxial loading during the creep test

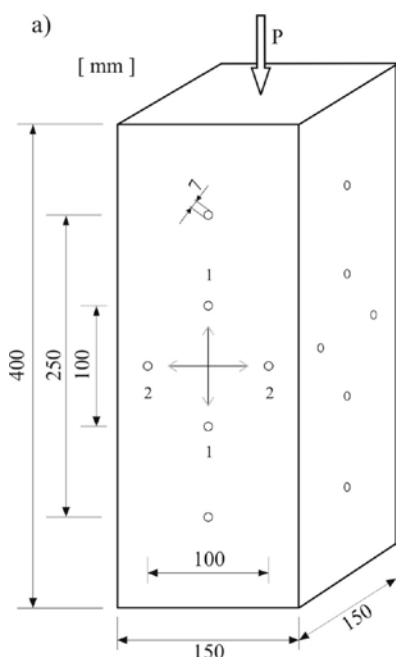
U drugoj fazi testa uzorci su rasterećeni: prva grupa uzoraka je potpuno rasterećena sa 2.0MPa na 0.0MPa, a druga grupa uzoraka je sa 4.0MPa rasterećena na 2.0MPa. Ovo naponsko stanje je održavano narednih 30 dana. Treća faza testa je doopterećivanje uzoraka: prva grupa uzoraka je doopterećena u inkrementima do 4.0MPa, a druga grupa do 6.0MPa. Deformacija puzanja je praćena narednih 150 dana.

loading, unloading and reloading to a higher level of stress with maintaining its value constant after the stress change. Loading of the sample was conducted in increments of 25% of defined level of stress in the creep test, for every group of samples. Loading of each sample lasted for an hour. After reaching defined level of stress in the creep test (2.0 or 4.0MPa, which is about 25% and 50% of uniaxial strength of the tested marl), the samples



Slika 4. Dijagram toka testa puzanja jednoosijalno opterećenih prizmatičnih uzoraka
Figure 4. Diagram of phases of the creep test of uniaxially loaded prismatic samples

Nakon opterećivanja, mjerene su deformacije puzanja u pravcu vertikalne (podužne) i horizontalne ose uzorka (na četiri neopterećene stranice uzorka) kako je prikazano na sl. 5.a. Mjerenja su mehaničkim deformetrom (tipa "Pfender", tačnosti 1/1000mm), obavljana nakon 1,3,6,12 i 24 sata od nanošenja opterećenja, zatim nakon 3,7 i 15 dana, a u preostalom periodu svakih 30 dana. Intervali mjerenja su odabrani tako da razlike predhodne i tekuće mjerene deformacije budu približno jednake (rezultati ovih testova su ranije prezentovani, Tomanović, 2007)



Slika 5. Prizmatični uzorak: a) šema mjernih mjesta; b) uzorak u toku testa puzanja (zaštićen parafinom)
Figure 5. Prismatic sample: a) scheme of measurement points; b) samples during the creep test (coated by paraffin)

3 EFEKT PREKONSOLIDACIJE

Ponašanje materijala koji se vremenski zavisno deformišu značajno zavisi od naponsko – defomacijske predistorije. Tako u vremenski zavisnim uslovima na aktuelnu deformaciju, pored trenutnog naponskog stanja, utiče nivo i trajanje apliciranog opterećenja u prošlosti. Ovi efekti su dobro ispitani kod sitnozrnog tla (opisani kroz široko poznat efekat prekonsolidacije), međutim kod stijenskog materijala postoji nedovoljna ispitanoost ovog efekta, a posebno kvantifikacije efekata prekonsolidacije.

Rezultati ispitivanja na prizmatičnim jednoaksijalnim uzorcima u trećoj fazi testa, u kojoj su uzorci nakon rasterećenja ponovno doopterećeni na veći napon, ukazuju na značajan uticaj naponske istorije na aktuelnu deformaciju ispitivanog laporca. Uticaj naponske predistorije (dostignutog napona u prošlosti) na defomacijski odgovor materijala je vidljiv pri ponovnom kratkotrajnom opterećivanju, ali i na tok defomacije puzanja, dakle i na vremenski zavisne defomacije.

were kept under constant stress for the following 180 days, which is the first phase of the creep test. In the second phase, the samples are unloaded; first group of samples is completely unloaded from 2.0MPa to 0.0MPa, and the second group of samples is unloaded from 4.0MPa to 2.0MPa. This stress state was maintained for the following 30 days, as sufficient time for relaxation of deformations.

The third phase of the test is additional loading of the sample: first group of samples was additionally loaded in increments up to 4.0MPa, and the second group up to 6.0MPa. Creep deformation was monitored during the following 150 days.

After loading, creep deformations in vertical and horizontal direction of the sample (on four unloaded sides of the sample) were measured as presented in Figure 5a. The measurements were carried out by a mechanical deformeter (of type "Pfender" whose preciseness is 1/1000 mm), in intervals of 1, 3, 6, 12 and 24 hours from the time of loading, then after 3, 7 and 15 days, and during the rest of the testing time on every 30th day. Intervals of measurement are chosen in such a way that differences of the previous and current measured deformation are approximately equal (results of these tests were presented before Tomanovic, 2007).

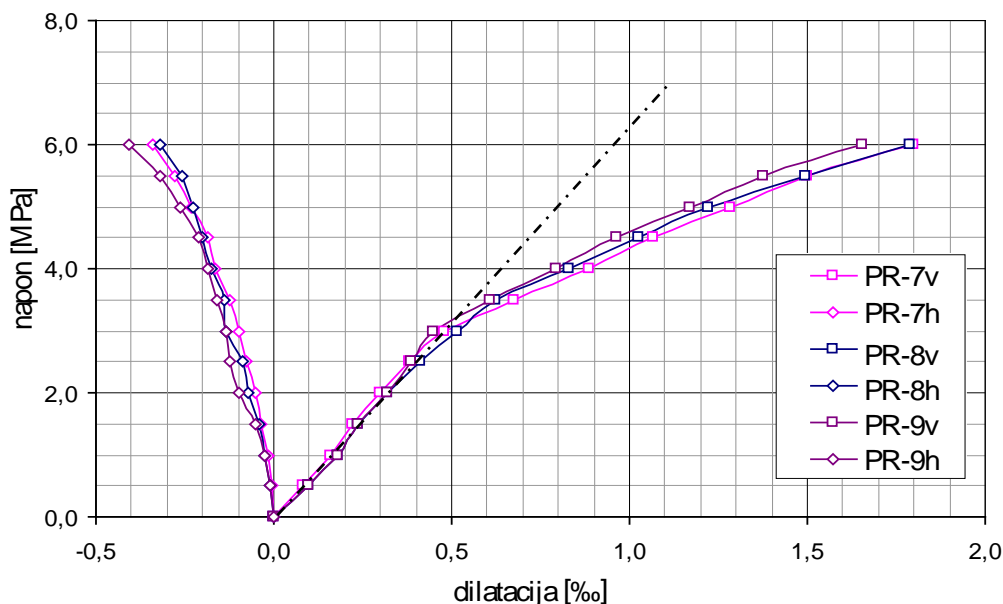
3 EFFECT OF PRECONSOLIDATION

Behavior of materials with time dependent deformations, depend on stress-deformation pre-history. Thus, under time dependent conditions, current deformation is impacted, apart from the current stress state, by the extent of duration of the applied past loading. These effects are well examined in fine-grained soil (described in well known effect of preconsolidation). However in the

3.1 Efekti prekonsolidacije pri ponovnom kratkotrajnom opterećivanju

Nakon perioda relaksacije materijala u drugoj fazi testa prizmatični uzorci su ponovo u inkrementima opterećivani u vertikalnom pravcu do višeg nivoa napona u cilju formulisanja funkcije zavisnosti puzanja od nivoa napona. Pri ovom kvazi statičkom - kratkotrajnom opterećivanju mjerene su vrijednosti napona i deformacija (dilatacija).

Na sl. 6 prikazan je dijagram napon-dilatacija pri ponovnom opterećivanju prizmatičnih uzoraka (početak III faze testa) nakon rastrećenja do nule i perioda relaksacije. (Oznaka u legendi uz broj prizme ukazuje na vertikalni (v) i horizontalni (h) pravac mjerenja dilatacija). Na dijagramu se uočava promjena krutosti materijala u vertikalnom pravcu nivou napona 3.0-3.3 MPa. Dakle, omekšanje se dešava nakon dostizanja nešto manjeg napona od napona pod kojim je uzorak bio opterećen pri ranijem testu puzanja. Uticaj napona vertikalnog napona prekonsolidacije ima uticaj na očvršćavanje materijala u vertikalnom pravcu, ali se uticaja na bočne deformacije ne može uočiti.



Slika 6. Dijagram napon-deformacija pri opterećivanju prizmatičnih uzoraka na veći nivo napona (test puzanja pri naponu 4.0MPa u toku 6 mjeseci je prethodio fazi 2 relaksacije)

Figure 6. Diagram of stress-strain at the event of loading of prismatic samples to a higher level of stress (creeping test with 4.0MPa stress during the period of 6 months preceded II Relaxation Phase)

Za poređenje na dijagramu sl. 7. prikazano je ponašanje nekonsolidovanog materijala pri prvom opterećivanju i prekonsolidovanog materijala nakon dejstva napona od 2.0 i 4.0 MPa. Deformacija pri naponu od 4.0MPa, pri ponovnom opterećivanju, je tri puta manja od deformacije pri prvom opterećivanju na uzorcima koji su ranije dugotrajno opterećeni na 4.0 MPa. Uočljivo je manje rasipanje rezultata nakon dugotrajnog testa puzanja.

Treba napomenuti da su uzorci, podvrgnuti testu puzanja pri naponu od 2.0 MPa, oslobođeni napona do nule 30dana prije ponovnog opterećivanja tako da je bila "oslobođena" vremenska deformacija povratnog puzanja, dok su uzorci opterećeni sa 4.0MPa pri testu puzanja

case of rock material this effect is not examined sufficiently, particularly quantification of the effect of preconsolidation.

Results of examinations on prismatic uniaxial specimens in the third phase of the test, where specimens, after unloading were again additionally loaded with higher stress, indicate how important effect stress history has on actual deformation of the examined marl. Influence of stress pre-history (achieved stress in the past) on deformation response of the material is visible in the event of the new short loading but also on the course of creeping deformation and therefore on time dependent deformations.

3.1 Effect of preconsolidation in case of short reloading

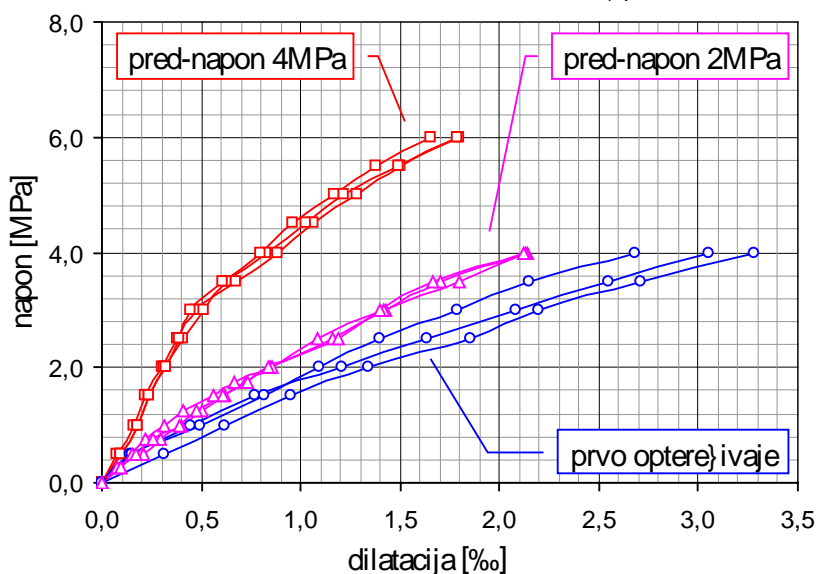
After the period of relaxation of material in the second phase of the test, prismatic specimens were reloaded in increments in vertical direction with higher stress level in order to formulate dependence of creeping on stress level. At this quasi-static short load, values of stress and deformation were measured (strain).

Figure 6 shows diagram of stress-strain at the event of reloading of prismatic specimens (beginning of III phase of the test) after unloading to zero and the period of relaxation. (Sign in the legend with the number of prism indicates vertical (v) and horizontal (h) direction of measurement of dilatations). The diagram shows change of stiffness of material in vertical direction of the stress on the level 3.0-3.3MPa. Therefore softening occurs after reaching of somewhat lower stress level compared to the stress under which the specimen was loaded in earlier test of creeping. Impact of vertical stress of preconsolidation has impact on hardening of material in vertical direction, but impact on lateral deformations cannot be noticed.

rastrećeni do napona 2.0 MPa 30 dana prije ponovnog opterećivanja, a sa napona 2.0MPa do nule nekoliko sati prije ponovnog opterećivanja. Kod druge grupe uzoraka, nije bilo dovoljno vremena da se razvije puna zaostala elastična deformacija tj. deformacija povratnog puzanja, što objašnjava i značajno manje mjerene ukupne deformacije pri ponovnom opterećivanju na napon 4.0MPa (uzorci sa prednaponom 4.0 MPa).

Comparative diagram of stress-strain at the event of loading indicates that in the case of the examined marl there is a significantly expressed effect of hardening of material under short load. Behaviour of material significantly depends on the level of stress pressure under which the material was loaded during the longer period of time (during creeping test). As preconsolidation stress increases impact on behaviour of the material increases under reloading as well.

It should be mentioned here that specimens subject to creeping test under 2.0 MPa stress were released from stress to zero, 30 days before reloading and time deformation of reverse creeping was "released" while the specimens reloaded under 4.0 MPa during the test of creeping were stress released to 2.0 MPa stress 30 days before reloading, and from 2.0 MPa stress to zero several hours before reloading. In the case of the second group of specimens, there was not enough time for full delayed elastic deformation to develop, that is, deformation of reversible creeping, which explains significantly lower measured total deformations under reloading under 4.0 MPa stress (specimens with 4.0 MP pre-stress).



Slika 7. Dijagram napon-deformacija pri ponovnom opterećivanju prizmatičnih uzoraka
Figure 7. Diagram of stress-strain under reloading of prismatic specimens

3.2 Rezultati testa puzanja doopterećenih prizmatičnih uzoraka

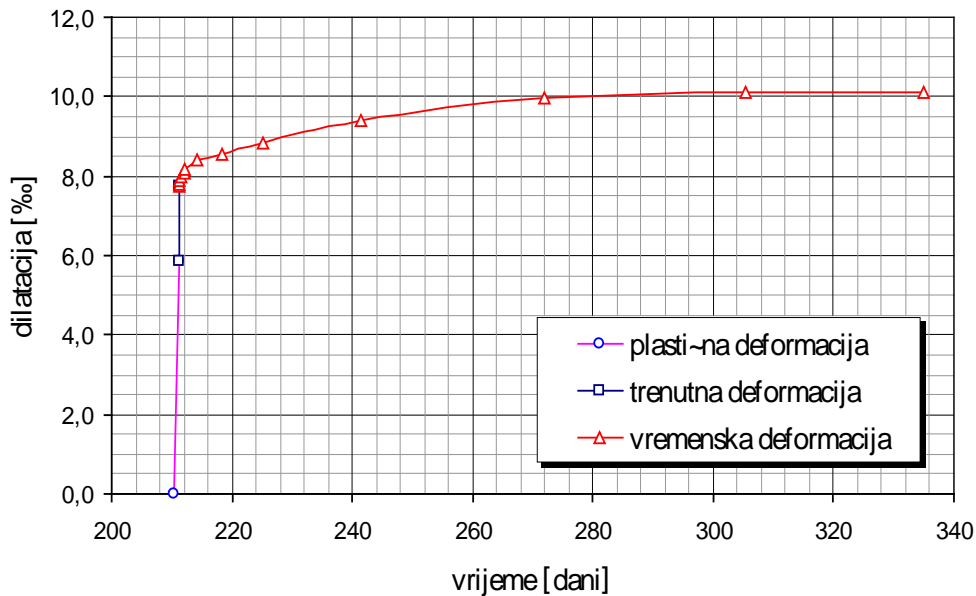
U trećoj fazi testa, nakon potpunog rasterećenja, prizmatični uzorci su ponovo opterećeni u inkrementima na sljedeći veći nivo napona testa puzanja. Na dijagramima sl. 8 i 9. prikazani su rezultati mjerenja deformacija grupe uzoraka koji su doopterećeni na 6.0MPa, nakon predhodnog testa puzanja pri konstantnom naponu 4.0 MPa.

Ukupna plastična deformacija, koja je zaostala nakon testa puzanja, pri konstantnom naponu od 4.0MPa u toku 180 dana, iznosi oko 6 ‰, sl. 8. Trenutna deformacija pri ponovnom opterećivanju do napona od 6.0 MPa isnosi oko 2 ‰, dok deformacija puzanja u toku 125 dana iznosi narednih 2 ‰.

3.2 Results of tests of creeping of additionally loaded prismatic specimens

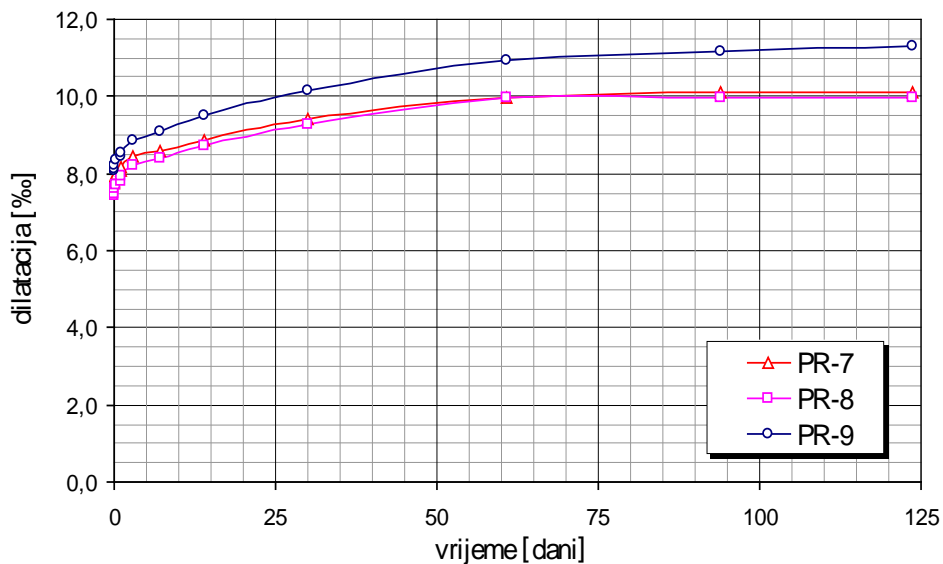
In the third phase of testing after total unloading, prismatic specimens were loaded again in increments to reach the following stress level during the test of creeping. Diagrams presented in Figures 8 and 9, show the results of measurements of deformations concerning group of specimens, which were additionally loaded by 6.0 MPa after the previously conducted creeping test where constant stress was 4.0MPa.

Total plastic deformation, delayed after the creeping test, under constant 4.0MPa stress during the period of 180 days was about 6 ‰, Figure 8. Current deformation under the repeated loading under 6.0MPa stress was about 2 ‰, while creeping deformation during the period of 125 days consisted of the remaining 2 ‰.



Slika 8. Dijagram ukupne aksijalne deformacije prizmatičnih uzoraka nakon opterećenja na 6.0MPa (nakon potpunog rasterećenja)

Figure 8. Diagram of total axial deformation of prismatic specimens after loading at 6.0MPa (after full unloading)



Slika 9. Dijagram deformacije puzanja prizmatičnih uzoraka nakon ponovnog opterećivanja na 6.0MPa (nakon rasterećenja napona sa 4.0MPa do nule)

Figure 9. Diagram of deformation of creeping of prismatic specimens after repeated loading with 6.0MPa (after stress unloading from 4.0MPa to zero)

3.3 Efekat prekonsolidacije na vremenske komponente deformacije pri ponovnom testu puzanja

Na sl. 10. prikazan je uporedni dijagram puzanja pri naponu 4.0MPa nekonsolidovanih i prekonsolidovanih prizmatičnih uzoraka pri naponu konsolidacije 2.0 MPa. Na dijagramu se vidi da je početna deformacija prekonsolidovanih uzoraka manja od deformacije nekonsolidovanih. Takođe, dijagrami puzanja nekonsolidovanih i prekonsolidovanih uzoraka imaju različit oblik u prvih 60

3.3 Effect of preconsolidation on time components of deformation in the new creeping test

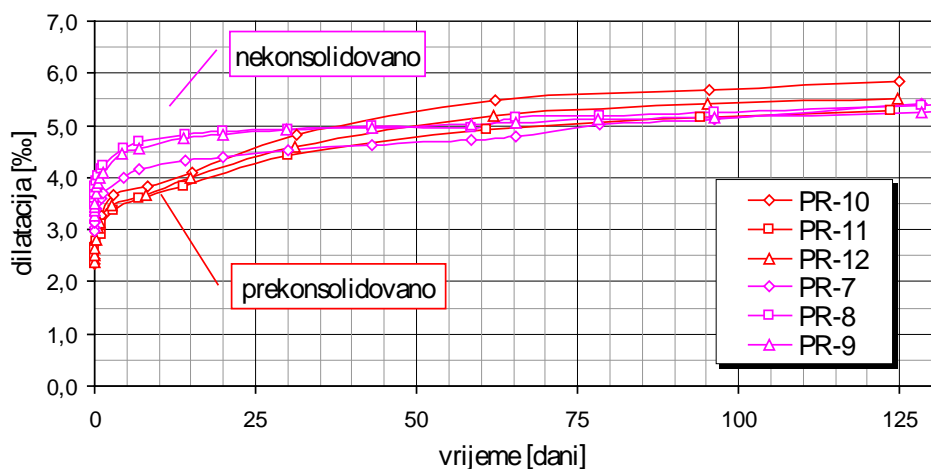
Figure 10 shows comparative diagram of creeping under 4.0 MPa stress of unconsolidated and preconsolidated prismatic specimens under consolidation stress 2.0 MPa. Diagram shows that initial deformation of preconsolidated specimens is smaller than deformation of unconsolidated specimens. Also diagrams of creeping of unconsolidated and preconsolidated specimens have

dana nakon opterećivanja. Nakon ovog perioda, oblik dijagrama puzanja je gotovo identičan, a ukupna deformacija (početna + puzanje) se izjednačava.

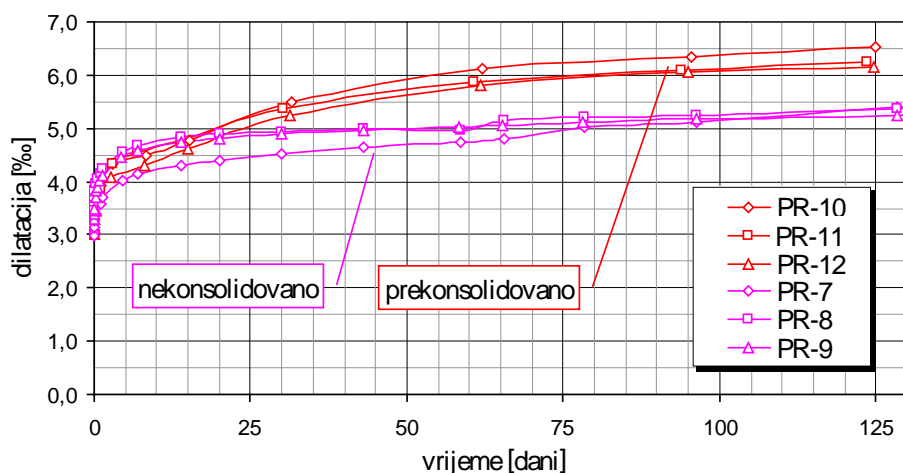
Uporedni dijagram deformacije puzanja sl. 11. pokazuje da su deformacije puzanja (vremenski zavisne komponente deformacija) prekonsolidovanih uzoraka veća od deformacije puzanja nekonsolidovanih uzoraka. Oblik dijagrama deformacije puzanja je skoro identičan u prvih pet do sedam dana gdje je dominantna komponenta primarnog puzanje (za detalje vidi Tomanović, 2007). Predhodno opterećenje očigledno ima uticaj na razvoj primarne komponente puzanja (zakašnjele elastičnosti). Ova komponenta vremenski zavisnih deformacija je nakon dugog opterećenja manja od komponente koja se razvija na inicijalno opterećenim uzorcima. Nakon sedam dana, prekonsolidovani uzorci imaju veći priraštaj deformacije od nekonsolidovanih uzoraka, gdje veći uticaj ima sekundarna komponenta deformacije puzanje.

different form in the first 60 days after loading. After this period form of diagram of creeping is almost identical and total deformation (initial + creeping) is equalized.

Comparative diagram of creeping deformation in the Figure 11. shows that creeping deformations (time dependent components of deformations) of preconsolidated specimens are bigger than deformations of creeping of unconsolidated specimens. Form of diagram of creeping is almost identical in the first five to seven days when the component of primary creeping is dominant (for details see Tomanovic, 2007). Previous loading obviously impacts development of primary creeping component (delayed elasticity). This component of time dependent deformations was, after long loading, smaller than the component developed on initially loaded specimens. After seven days preconsolidated specimens have bigger deformation yield compared to unconsolidated specimens where secondary component of creeping deformation has bigger impact.



Slika 10. Uporedni dijagram ukupne deformacije testa puzanja pri naponu od 4.0MPa nekonsolidovanog i prekonsolidovanog materijala pod naponom 2.0MPa.
Figure 10. Comparative diagram of total deformation of the test of creeping under 4.0MPa stress of unconsolidated and reconsolidated material under 2.0MPa stress.



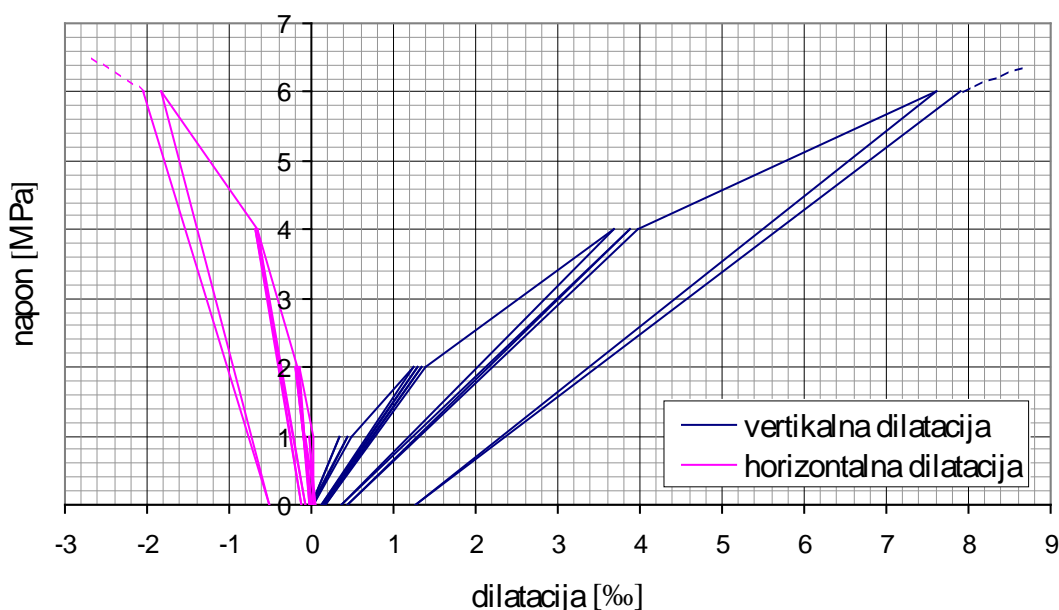
Slika 11. Uporedni dijagram deformacije puzanja pri naponu od 4.0MPa nekonsolidovanog i prekonsolidovanog materijala pod naponom 2.0MPa (početak vremenskih deformacija "prekonsolidovanih" uzoraka je poklopljen sa "nekonsolidovanim")
Figure 11. Comparative diagram of deformation of creeping under 4.0MPa stress of uncontrolled and preconsolidated material under 2.0MPa stress (beginning of time deformations of "reconsolidated" specimens corresponds with "unconsolidated" specimens)

4 EFEKTI CIKLIČNOG OPTEREĆIVANJA

Na sl. 12. prikazan je dijagram napona i deformacija laporca pri cikličnom opterećenju i rasterećenju. Na dijagramu se može uočiti da nivo zaostale aksijalne deformacije raste sa povećanjem napona, ali odnos zaostale deformacije ε_{1p} i deformacije dostignute pri prvom opterećivanju ε_1 nakon nekoliko ciklusa opterećivanja i rasterećivanja ostaje približno konstantan. U tabeli 1. prikazan je odnos zaostale deformacije nakon rasterećenja ε_{1p} i deformacije dostignute pri prvom opterećenju ε_1 .

4 EFFECTS OF CYCLIC LOADING

Figure 12 shows stress and marl deformation diagram during cyclic loading and unloading. This diagram also shows that the level of delayed axial deformation grows with stress increase, but relation of delayed strain ε_{1p} and deformation obtained during the first load ε_1 after several cycles of loading and unloading remains almost unchanged. Table 1 shows the relation of delayed deformation after unloading ε_{1p} and deformation reached at first loading ε_1



Slika 12. Dijagram napona i deformacija laporca pri cikličnom opterećenju i rasterećenju na prizmatičnom uzorku (15x15x40cm)

Figure 12. Diagram of stress and marl deformations during cyclic loading and unloading on prismatic specimen (15x15x40cm)

Tabela 1. Zaostale deformacije nakon rasterećenja
Table 1 Delayed deformations after unloading

Dostignuti napon [MPa]	1.0	2.0	4.0	6.0
Odnos $\varepsilon_{1p} / \varepsilon_1$ nakon prvog opterećivanja:	0.0022	0.09	0.12	0.17
Odnos $\varepsilon_{1p} / \varepsilon_1$ nakon ciklusa opterećivanja:	0.0044	0.128	0.113	0.118

U kontekstu promjene modula elastičnosti pri cikličnom opterećenju se javlja dobro poznat efekat omekšanja materijala (Jaeger & Cook, 1973). Modul elastičnosti, u istom naponskom nivou, opada sa povećanjem ciklusa opterećenja i rasterećenja, asimptotski težeći konstantnoj vrijednosti, dakle, dolazi do omekšanja materijala. Ciklično opterećenje ima popuno drugačiji efekat na krutost u odnosu na dugotrajno konstantno opterećenje.

In the context of changes of elasticity modules during cyclic loading, a well known material softening effect appeared (Jaeger & Cook, 1973). Elasticity module decreases under the same stress level simultaneously with increase of loading and unloading cycle, asymptotically aiming at constant value, whose eventual result is softening of materials. Cyclic loading impacts solidity of material in a completely different manner compared to long term constant loading.

I jedan i drugi opit, cikličnog opterećivanja i rastećivanja i test puzanja, nakon dovoljnog broja ciklusa ili protoka vremena u dovoljno visokom nivou napona (koji je znatno ispod kratkotrajnog uslova loma) dovode do loma materijala. Ipak, efekti na krutost materijala su potpuno drugačiji. U mikro strukturi materijala, očigledno, ova dva po svemu destruktivna opita dovode do potpuno različitih efekata. Ciklično opterećenje dovodi do prekida pojedinih veza u mikrostrukturi materijala, što kao posledicu ima omekšanje materijala. Sa druge strane kod testa puzanja, pri naponima pritiska, dolazi do efekata koji su slični prekonsolidaciji glinovitih materijala. Dugotrajno opterećenje dovodi do laganog klizanja i regrupisanja pojedinih zrna materijala što kao krajnji efekat ima bolju »upakovanost« zrna, a time i veće module deformabilnosti - ojačanje u odnosu na materijal prije djelovanja dugotrajnog opterećenja.

5 ZAKLJUČAK

Analizom naponsko-deformacijskih veza u toku ponovljenog opterećivanja ustanovljeno je da se u toku testa puzanja dešava jedna vrsta konsolidacije materijala, gdje dolazi do izvjesnog »regrupisanja« i »reorijentacije« zrna stijenskog materijala. Može se zaključiti da uzorci koji su inicijalno opterećeni u istom nivou napona, pod uticajem gore opisanog efekta rezultira očvršćavanjem materijala u poređenju sa prvim opterećenjem, odnosno imaju manje kratkotrajne deformacije u toku ponovnog opterećivanja, ali veće vremenski zavinsne deformacije.

Ova ograničena eksperimentalna evidencija ide u prilog tezi da je primarno puzanje zapravo zakašnjela elastičnost, na koju nema bitnog uticaja prekonsolidacija materijala, dok je uticaj prekonsolidacije na sekundarnu komponentu puzanja znatan u vremenskom periodu od nekoliko mjeseci nakon ponovnog opterećivanja. Ukupna deformacija, nakon dovoljno dugog vremena, nije se pokazala znatno zavisnom od napona prekonsolidacije u razmatranom naponskom opsegu.

6 LITERATURA

- [1] Bergues J. & Nguyen D., Hoetit N., *Time dependent behaviour of hard marls*, The Geotechnics of hard Soils-Soft Rock, Evangelista & Picarelli (ed), Balkema, Rotterdam, 1998.
- [2] Cristescu N.D., *Rock Rheology*, Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [3] Cristescu N.D & Hunsche U., *Time effects in Rock Mechanics*, John Wiley & Sons, 1998.
- [4] Doring T. and Kiehl J.R., *Das primare, sekundare und tertiare Kriechen von Steinsalz - Ein dreidimensionales rheonomes Stoffesetz*, Geotechnick 1996/3, 194-199;
- [5] Jaeger J.C. & Cook N.G.W., *Fundamentals of Rock Mechanics*, Chapman and hall Ltd. And Science Paperbanks, 1971.

Both tests which include cyclic loading and unloading as well as creeping tests, after sufficient number of cycles or passing of time under sufficiently high level of stress (which were exposed to a short-term yield condition) lead to breakage of material. However effects in terms of solidity of materials are totally different. In micro structure of materials, obviously, these two, in all terms destructive tests, have totally different outcomes. Cyclic loading leads to breakage of individual connections in micro-structure of materials which results with softening of material. On the other hand, in creeping tests with stress pressures included effects similar to preconsolidation of clay materials appear. Long loading leads to slow sliding and regrouping of individual material grains which results with better "packed" grain and also bigger deformation modules - reinforcements compared to the material before it was exposed to long loading.

5 CONCLUSION

Analyzing stress-strain relations under repeated loading, it has been established that during creep test some kind of consolidation has been happening where certain "regrouping" and "reorientation" of grains of rock material happened. It can be concluded that for specimens that are initially loaded at the same stress level, the above mentioned effects result in material hardening in relation to the first loading, i.e. smaller short-term deformations during reloading, but higher time dependent deformation component during creep test.

This limited experimental record supports the hypothesis that primary creeping is actually delayed elasticity which is not significantly influenced by preconsolidation of material, while the impact of preconsolidation on secondary component of creeping is significant in the period of time of several months after repeated loading. Total deformation, after sufficiently long period of time, did not show to be significantly dependent on the stress of preconsolidation in the considered amount of stress.

6 REFERENCES

- [6] Keihl J.R., and Reim J., *Athree-dimensional constitutive law for rock salt including transient, steady state and accelerated creep, failer asa well as post failer behaviour*. Proc. 9th ISRM Congres, Vol. 2, Paris, 1998, pp 917-920.
- [7] Kharchafi M., and Descoedres F., *Comportement differe des roshes marnieuses encaissant les tunnels (Behaviour of tunnels in creeping marls)*, Ecole Polytechnique federale de Lausanne, Laboratoire de Mecanique des Roshes, Suisse, 1995.
- [8] Tomanovic Z. Reoloski model puzanja matriksa meke stijene, Materijali i konstrukcije – Materials and stucture, Beograd, 1-2, pp. 3-19, 2007
- [9] Wallner M., *Stability calculation concerning a room and pillar desing in rock salt*, International Congres for Geotechnics, Melbourne, 1983.

REZIME

OČVRŠĆAVANJE MEKE STIJENE NAKON DUGOTRAJNOG PRITISKA I OMEKŠANJE POD DEJSTVOM CIKLUČNOG OPTEREĆENJA

Zvonko TOMANOVIĆ

Najveći broj istraživanja vezanih za ponašanje stijene pod dugotrajnim opterećenjem pri sobnim temperaturama izveden je na uzorcima kamene soli. Postoji daleko manji broj publikovanih eksperimentalnih rezultata dobijenih na laporcu ili sličnim stijenama koje karakteriču značajne deformacije puzanja.

U cilju formulisanja reološkog modela meke stijene, izvedeni su testovi puzanja na uzorcima laporca. Nakon nanošenja opterećenja na jednoaksijalne prizmatične uzorke u trajanju od 6 mjeseci izvršeno je njihovo rasterećenje. Nakon rasterećenja ostavljeno je dovoljno vremena da se oslobodi najveći dio povratne deformacije i nakon toga je ponovo nanoseno opterećenje, ali na većem nivou napona od prethodnog. Evidentan je uticaj predhodnog dugovremenskog opterećenja u toku testa puzanja na veličinu kratkotrajnih deformacija, ali i na dalji tok puzanja tj. na vremenski zavisne deformacije.

Analizom naponsko-deformacijskih veza u toku ponovljenog opterećivanja ustanovljeno je da se u toku testa puzanja dešava jedna vrsta konsolidacije materijala, gdje dolazi do izvjesnog "regrupisanja" i "reorijentacije" zrna stijenskog materijala. Može se zaključiti da uzorci koji su inicijalano opterećeni u istom nivou napona, pod uticajem gore opisanog efekta rezultira očvršćavanjem materijala u poređenju sa prvim opterećenjem, odnosno imaju manje kratkotrajne deformacije u toku ponovnog opterećivanja, ali veće vremenski zavisne deformacije.

Ključne riječi: očvršćavanje, omekšanje, puzanje, ciklično opterećenje, laporac

SUMMARY

SOFT ROCK HARDENING AFTER THE LONG-TERM COMPRESSION AND SOFTENING AFTER CYCLIC LOAD MIHA TOMAŽEVIČ

Zvonko TOMANOVIĆ

Most of research referring to rock behaviour under of long-term loading at room temperature, published in the world so far, have been carried out on the samples of rock salt. There are very few published experimental results carried out on marl or similar rocks characterized by significant creep deformations.

In order to define rheological model of soft rock, creep tests on specimens of marl have been conducted. After six months of loading on the uniaxial prismatic specimen, sample has been unloaded during creep test. Sufficient time was allowed for relaxation of deformations, followed by loading but at the higher stress level. The influence of initial stresses on deformation response of marl is evident at the short-term loading, but also has influence on further process of creep deformation i.e. on time dependent deformations.

Analyzing stress-strain relations during repeated loading, it has been established that during creep test some kind of consolidation has been happening where certain "regrouping" and "reorientation" of grains of rock material happened. It can be concluded that for specimens that are initially loaded at the same stress level, the above mentioned effects result in material hardening in relation to the first loading, i.e. smaller short-term deformations during reloading, but higher time dependent deformation component during creep test.

Key word: hardening, softening, creep, cyclic load, marl

PRORAČUN SMIČUĆE NOSIVOSTI GREDA OD BETONA VISOKE ČVRSTOĆE

PREDICTION OF SHEAR STRENGTH IN HIGH-STRENGTH CONCRETE BEAMS

Radmila SINĐIĆ-GREBOVIĆ

ORIGINALNI NAUČNI RAD
UDK: 624.072.45.046 = 861

1 UVOD

Kod armiranobetonskih greda, pri dejstvu poprečnih sila, javljaju se unutrašnji momenti savijanja i sile smicanja. Smičući lom kod armiranobetonskih greda najčešće je prouzrokovan sadejstvom sile smicanja, momenta savijanja i aksijalne sile, a prethodi mu pojava kose prsline. Prisustvo sile smicanja može znatno redukovati nosivost grede u odnosu na nosivost pri čistom savijanju, pri čemu lom može nastupiti iznenada, bez vidljivih najava. Klasična teorija grede omogućava jednostavan proračun nosivosti greda na savijanje. Međutim, proračun smičuće nosivosti armiranobetonskih greda je znatno složeniji problem od proračuna nosivosti na savijanje. Zahvaljujući rezultatima velikog broja istraživanja ovog problema definisano je više različitih postupaka i izraza za proračun, čiji rezultati nijesu uvijek dovoljno saglasni sa rezultatima testova.

Neka od novijih istraživanja su pokazala da aktuelni izrazi za proračun nosivosti na smicanje mogu dati nekonzervativne rezultate kada se primijene za grede od betona visoke čvrstoće. Ovo se može reći i za neke od jednačina koje su uključene u proračunske kodove. Isti zaključak je dat u [8] prema rezultatima većeg broja istraživanja, [1], [4] i drugih. Većina izraza koji se koriste za proračun nosivosti na smicanje su empirijske jednačine, i predstavljaju funkcije koje uključuju nekoliko najvažnijih parametara. Dio rezultata koji se odnosi na svojstva svježeg betona je publikovan ranije [9].

1 INTRODUCTION

When reinforced concrete beams are exposed to transverse forces actions, the internal flexural moment and shear force appear. The shear failure of reinforced concrete beams is most often caused by shear forces in combination with moments and axial forces, and is preceded by inclined cracking. Beam flexural strength may be greatly reduced by the presence of shear with respect to the pure flexure case, and failure may occur in the brittle way and without warning signs. Classical beam theory provides a simple model for designing beams to resist bending. However, prediction of shear strength of reinforced concrete beams is more complicated than prediction of flexural strength. Due to the results of many researches of this problem, many different solutions and design expressions have been defined, whose results are not enough compatible with test results.

Some of the recent researches have shown that current expression for shear strength design may give non-conservative predictions when applied to high-strength concrete beams. Same may be stated for some of design codes provisions. Such conclusion was given in [8], according to results of many researches shown in [1], [4] and others. Majority of expressions used for shear strength design are empirical equations, and they represent expressions that include several of the most important parameters. Part of results, which related on fresh properties, have been published in [9].

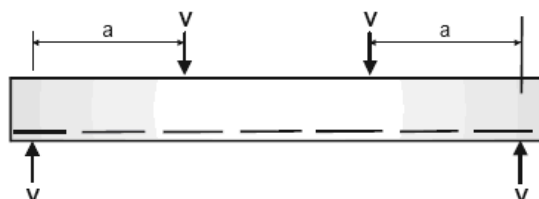
Mr Radmila Sinđić-Grebović, Univerzitet Crne Gore,
Građevinski fakultet, Cetinjski put bb, 81000 Podgorica,
Crna Gora;
e-mail: radmilas@ac.me

Radmila Sinđić-Grebović, MSc, University of
Montenegro, Faculty of Civil Engineering,
Cetinjski put bb, 81000 Podgorica, Montenegro;
e-mail: radmilas@ac.me

2 GREDNO I LUČNO DEJSTVO KOD PRENOSA POPREČNIH SILA

Mehanizam prenosa sila smicanja kod armirano-betonskih greda je kompleksan i zavisi od većeg broja faktora. Različiti istraživači su na različite načine ocijenili relativni uticaj pojedinih faktora na mehanizam prenosa smičućih sila.

Parametar od posebnog značaja, koji utiče na mehanizam prenosa smičuće sile, a samim tim i na smičuću nosivost elementa, je relativni raspon smicanja ili odnos a/d . Raspon smicanja a predstavlja rastojanje između koncentrisane sile opterećenja i reakcije oslonca, prikazano na slici 1, dok je d statička visina grede.



Slika 1 Šema ispitivanja proste grede pri dejstvu poprečnih sila obično korišćena u eksperimentima
Figure 1 Scheme of the simply supported beam exposed to transverse force commonly used in the experiment

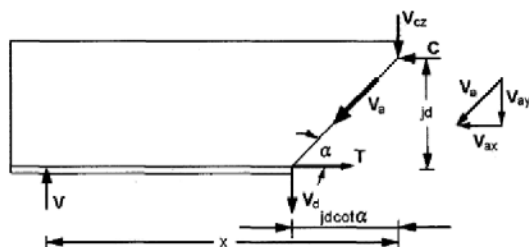
Otpor koji greda bez smičuće armature pruža dejstvu poprečnih sila, kako su zaključili Fenwick i Paulay 1968, prema [7], može se razmatrati kao efekat grede i efekat lučnog dejstva. Ovi efekti se mogu ustanoviti prema uslovima ravnoteže dijela grede između oslonca i kose prsline, na slici 1. Park i Paulay, kako je citirano u [7], usvajaju sljedeće pretpostavke: 1) rezultanta dejstva smicanja duž kose prsline ili sila međudejstva, koja se prenosi preko zrna agregata, se zamjenjuje silom V_a , čiji pravac dejstva prolazi kroz tačku dejstva unutrašnje sile pritiska C; 2) sila smicanja V_d , koju prenosi podužna armatura dejstvom klina ("dowel action"), se zanemaruje u jednačini iz uslova ravnoteže pri rotaciji.

2 BEAM AND ARCH ACTION IN TRANSFER OF SHEAR FORCE

Mechanism of shear force transfer in reinforced concrete beams is complex and dependent on many factors. Relative effect of different factors on shear force transfer mechanism were differently estimated by different researchers.

Shear span to depth ratio a/d is specially important parameter that influences shear force transfer mechanism, as well as the shear strength of the element. Shear span a is the distance between concentrated load force and reaction of support, as shown in Fig.1, while d is effective deep of a beam.

According to [7], it has already been concluded by Fenwick and Paulay (1968), that resistance of beams without stirrups to transverse force action may be considered as beam effect and arch action effect. These effects have been deduced by considering a beam part between the support and inclined crack, on Figure 1. Park and Paulay, as was cited in [7], assumed that: 1) the resultant of the aggregate interlocking stresses at the crack interface can be replaced by a force V_a , whose direction passes through the application point of the internal compression force; 2) the shear force due to the dowel action V_d , is negligible in the rotation equilibrium.



Slika 2 Sile koje djeluju na element grede unutar raspona smicanja, Park i Paulay, prema [7]
Figure 2 Forces acting in a beam element within the shear span, according [7]

U skladu sa navedenim pretpostavkama, uz uvođenje oznake za krak unutrašnjih sila $jd = z$, iz uslova ravnoteže slijedi izraz za moment savijanja u gredi:

$$M = V \cdot x = T \cdot z \quad (1)$$

Iz veze između sile smicanja i momenta savijanja kod grede, $V = dM/dx$ i jednačine (1) slijedi:

$$V = z \cdot \frac{dT}{dx} + T \cdot \frac{dz}{dx} \quad (2)$$

Consequently, if internal lever arm is $jd = z$, the resisting bending moment deduced from equilibrium condition is given by:

It follows that the relationship between shear force and the rate of change of bending moment along a beam, given with $V = dM/dx$, because of Equation (1) gives expression:

Prvi dio jednačine (2), $z \cdot dT/dx$, predstavlja izraz za doprinos efekta grede, pri čemu se sila zatezanja u armaturi duž grede mijenja $T=T(x)$, dok krak unutrašnjih sila z ostaje konstantan. U tom slučaju je $dz/dx=0$. Prenos sile grednim dejstvom je dominantan kod vitkih greda kod kojih preovladavaju B-regioni. Takva područja se nazivaju B regionima, prema Bernoulli-ju, jer za njih važi Bernoulli-jeva pretpostavka o ravnosti presjeka koja se koristi u klasičnoj teoriji grede.

Drugi dio jednačine (2) predstavlja doprinos lučnog dejstva. Ovaj mehanizam karakteriše promjenljiva vrijednost kraka unutrašnjih sila z duž ose grede, dok je vrijednost sile zatezanja T konstantna. Lučno dejstvo obezbjeđuje transfer opterećenja prema osloncu posredstvom pritiska po lučnoj putanji. Efekat lučnog dejstva raste sa smanjenjem relativnog raspona smicanja a/d .

3 POLAZNE JEDNAČINE

Većina aktuelnih jednačina za proračun nosivosti armiranobetonkih greda na smicanje izvedene su polazeći od bazičnih veza između nosivosti na smicanje i značajnih parametara. Konstante u jednačinama su određene primjenom statističke analize rezultata prethodno izvršenih testova pri smicanju. Kod nekih jednačina za proračun nosivosti na smicanje armiranobetonkih greda bez smičuće armature, uključena je samo čvrstoća betona pri pritisku. Novija istraživanja su pokazala da je pored čvrstoće betona u proračunske relacije neophodno uključiti veći broj parametara. Najvažniji parametri koji utiču na smičuću nosivost armiranobetonke grede bez smičuće armature, pored čvrstoće betona, su: koeficijent armiranja podužnom armaturom, visina poprečnog presjeka grede i relativni raspon smicanja a/d . Navedeni parametri su uvedeni u proračunske jednačine koje su zastupljene u savremenim proračunskim kodovima, kao što su CEB-FIP i EC2.

Postoji nekoliko jednačina za proračun nosivosti na smicanje koje uključuju navedene parametre. Izložena analiza, koja pokazuje da se smičuća nosivost može iskazati u obliku zbira grednog i lučnog dejstva, poslužila je za definisanje oblika polaznih jednačina. Jednačine za proračun smičuće nosivosti greda bez smičuće armature, date u [6], kao i jednačine za smičuću nosivost greda sa doprinosom smičuće armature, koje su date u [7], i koje važe za beton visoke čvrstoće, su poslužile kao osnova za definisanje inoviranih jednačina za proračun nosivosti na smicanje za armiranobetonke grede od betona visoke čvrstoće.

Jednačine Kim D. - Kim W. – Wight R.

Pri definisanju jednačine za proračun otpornosti greda na smicanje autori [6] su pošli od pretpostavke da se ona može iskazati kao kombinacija otpornosti dejstva grede i dejstva luka. Potpuno gredno dejstvo se javlja kod greda kod kojih krak unutrašnjih sila ostaje konstantan, što je pretpostavka prema elastičnoj teoriji grede. Drugi krajnji slučaj predstavlja čisto lučno dejstvo. Ovaj slučaj može nastupiti pri potpunom gubitku spoja između zategnute armature i betona duž cijelog raspona

The first part of the Equation (2), $z \cdot dT/dx$, expresses the resisting contribution of the beam action, in which the tensile force in the longitudinal reinforcement is supposed to vary $T=T(x)$, while the internal lever arm z is taken constant. In this solution relation $dz/dx=0$ is valid. Force transfer by beam action is dominant in slender beams, in which B-regions prevail. Such regions are termed B-regions, according to Bernoulli, because the classical beam theory with Bernoulli's assumption in which plane sections remain plane, is valid for them.

The second part of Equation (2) expresses the resisting contribution of the arch action. This mechanism is characterized by the variation of the internal lever arm z , along the beam axis, while the tension force T is constant. Arch action provides that vertical load be transferred to the support by means of compression along an arch path line. Arch action increases with decreasing values of shear span to depth ratio, a/d .

3 BASIC EQUATIONS

Majority of the current expressions for shear strength design of reinforced concrete beams are derived using basic relationship between shear strength and significant parameters. Constants of basic equations were determined by using statistical analysis of previous shear testing data. In some equations for shear strength design of reinforced concrete beams without shear reinforcement, only compressive strength of concrete is included. Recent researches have indicated that it is necessary to include more parameters in design equations, besides compressive strength of concrete. The most important parameters that influence the shear strength of reinforced concrete beams without stirrups, apart from concrete compressive strength, are: longitudinal reinforcement ratio, deep of the beam cross-section, and shear span to depth ratio, a/d . Named parameters are included in design equations that exist in current design codes, as CEB-FIP and EC2.

There are several equations for shear strength design that comprise these parameters. Exposed analysis, which shows that shear strength may be expressed as the sum of beam and arch action, is used to define basic equations form. Shear strength design equations, which are predicted for reinforced concrete beams without stirrups, given in [6], as well as equations for shear strength design of reinforced concrete beams with contribution of shear reinforcement, given in [7], which are valid for high-strength concrete, are used as base for defining innovative equations for shear strength design that are usable for reinforced high-strength concrete beams.

Equations by Kim D.-Kim W.-Wight R.

While defining the equation for shear resistance of beam the authors [6] have departed from the assumption that it can be expressed as a combination of beam and arch actions. The perfect beam action can be obtained if the internal moment arm length remains constant, as assumed in normal elastic beam theory. The second extreme case represents the pure arch action. This case occurs when the bond between reinforcement and

luka. Međutim, smičuća otpornost armiranobetonske grede gotovo uvijek predstavlja kombinaciju otpornosti ova dva mehanizma.

Za proračun smičuće nosivosti greda bez armature za smicanje, autori [6] su primijenili jednačinu (2). Doprinos grednog dejstva je iskazan u funkciji čvrstoće betona pri pritisku u obliku $dT/dx=k_1(f_{ck})^{0.5}$. Promjenljivi krak unutrašnjih sila je dat izrazom:

$$z(x) = (1 - \sqrt{\rho}) \left(\frac{x}{a} \right)^r d \quad (3)$$

gdje je: $r = (d/a)^{0.6} (\rho)^{-0.1}$;

ρ - koeficijent armiranja podužnom zategnutom armaturom.

Sila zatezanja u armaturi je $T=f_s \rho b d$, pri čemu je f_s napon u armaturi i predstavlja konstantu, dok je b širina poprečnog presjeka grede. Ako se ova jednakost primijeni u jednačini (2), a umjesto $z(x)$ uvrsti izraz (3) i $x=d$ dobija se jednačina u obliku zbira efekata grednog i lučnog dejstva. Primjenjujući date izraze i rezultate eksperimentalnih ispitivanja većeg broja prostih greda bez smičuće armature, opterećenih sa jednom ili dvije koncentrisane sile, autori su došli do jednačine za smičuću nosivost grede:

$$v_u = \frac{V_u}{bd} = 0.2 (1 - \sqrt{\rho}) \left(\frac{d}{a} \right)^r \cdot \left[(f_{ck})^{0.5} + 1020 \rho^{0.9} \left(\frac{d}{a} \right)^{0.6} \right] \quad (4)$$

Konstante u jednačini (4) koje iznose 0.2 i 1020 su određene empirijski, statističkom obradom podataka na osnovu velikog broja rezultata eksperimentalnih istraživanja iz literature (autori navode 30 referenci). Korišćeni su podaci za grede kod kojih je $a/d=0.98\sim 9.74$, sa čvrstoćom betona $f_{ck}=6\sim 109$ MPa i koeficijentom armiranja podužnom armaturom $\rho=0.001\sim 0.066$.

Jednačine Russo-a

Russo sa ostalima je izveo jednačine za proračun nosivosti na smicanje, koristeći jednačinu (5), Bažanta i Kima. Prema [7], ova relacija izvedena je razmatranjem efekata grednog i lučnog dejstva. Jednačina je predviđena za proračun smičuće nosivosti grede bez smičuće armature i pokazala se relevantnom za grede od betona normalne čvrstoće, ($f_{ck} \leq 50$ MPa).

Neka ispitivanja su pokazala da grede od betona visoke čvrstoće imaju analognu sliku prslina i sličan oblik loma kao grede normalne čvrstoće, ukoliko su saglasna preovlađujuća dejstva. Kad preovlađuje lučno dejstvo lom grede je tipa smicanje-pritisak, a u slučaju kad preovlađuje dejstvo grede lom je tipa dijagonalno zatezanje, nezavisno od čvrstoće betona. Autori [7] su koristeći ovu analogiju izveli formulu za beton visoke čvrstoće. Jednačinu (6), koja se primjenjuje za proračun nosivosti na smicanje greda od betona visoke čvrstoće bez smičuće armature, su izveli koristeći rezultate eksperimentalnih ispitivanja na 148 greda od betona

concrete is destroyed over the entire length of the span. However, the shear resistance in the case of reinforced concrete beams almost always represents a combination of these two mechanisms.

For calculation of shear strength, the authors [6] have applied equation (2). The contribution of the beam action is shown in the function of concrete compressive strength, as $dT/dx=k_1(f_{ck})^{0.5}$. Variable internal moment arm length is given as:

where: $r = (d/a)^{0.6} (\rho)^{-0.1}$;

ρ - longitudinal reinforcement ratio.

Longitudinal steel tension is $T=f_s \rho b d$, where f_s is yield stress of reinforcement and represents a constant, while b is the width of beam cross-section. If this equality is applied in the equation (2), and instead of $z(x)$ the expression (3) is put and $x=d$, the equation in the form of the sum of effects of beam and arch actions is obtained. Applying the given expressions and results of experimental researches of a large number of simple beams without shear reinforcement, loaded with one or two concentrated forces, the authors have come to the equation for shear strength of beam:

Constants in the equation which amount to 0.2 and 1020 are determined empirically, using statistical analysis of data based on a large number of results of experimental researches from the literature (the authors give 30 references). Data for beams with the characteristics $a/d=0.98\sim 9.74$, concrete strength $f_{ck}=6\sim 109$ MPa and longitudinal reinforcement ratio $\rho=0.001\sim 0.066$ were used.

Russo's Equations

Russo and the others derived equations for calculating the shear strength, using the equation (5), by Bažant and Kim. According to [7], this relation was derived by considering beam and arch actions. The equation is intended for the calculation of shear strength of beam without shear reinforcement and proved to be relevant for normal-strength concrete beams, ($f_{ck} \leq 50$ MPa).

Some researches have shown that high-strength concrete beams have analogue crack pattern and similar failure mode like normal strength beams, if the prevailing actions are similar. When arch action prevails, mode of failure is the shear-compression, while in the case when beam action prevails, mode of failure is diagonal tension, irrespective of the strength of concrete. The authors [7] have derived formula for high-strength concrete using this analogy. They have derived the equation (6), which is applied for the calculation of shear strength of reinforced beams, without shear reinforcement, using the results of experimental researches on 148 beams

visoke čvrstoće.

made of high-strength concrete.

$$v_{uc} = \xi \left[0.83 \rho^{1/3} f_{ck}^{1/2} + 206.9 \rho^{5/6} \left(\frac{a}{d} \right)^{-5/2} \right] \quad (5)$$

$$v_{uc} = \xi \left[0.97 \rho^{0.46} f_{ck}^{1/2} + 0.2 \rho^{0.91} f_{ck}^{0.38} f_{yl}^{0.96} \left(\frac{a}{d} \right)^{-2.33} \right] \quad (6)$$

gdje je: $\xi = 1 / \sqrt{1 + d / (25d_a)}$;

f_{yv} = granica razvlačenja podužne armature;
 d_a = maksimalno zrno agregata.

Jednačine za proračun smičuće nosivosti greda sa smičućom armaturom su izvedene uvažavajući pretpostavku da uzengije različito doprinose smičućoj nosivosti, zavisno od doprinosa lučnog i grednog dejstva. Za ocjenu preovlađujućeg dejstva analizira se kritična vrijednost relativnog raspona smicanja, $(a/d)_c$. Ako je $a/d < (a/d)_c$, što znači da preovladava lučno dejstvo, doprinos uzengija smičućoj nosivosti je manji od $\rho_v f_{yv}$. U suprotnom, ako je $a/d > (a/d)_c$ preovladava gredno dejstvo, i doprinos uzengija je veći ili jednak $\rho_v f_{yv}$. Prema tome, doprinos uzengija smičućoj nosivosti, se može iskazati u obliku $v_{si} = \psi \rho_v f_{yv}$, pri čemu je:

ρ_v – koeficijent armiranja smičućom armaturom;
 f_{yv} – granica razvlačenja smičuće armature.

Vrijednost $(a/d)_c$ se određuje iz uslova da odnos M_{uc}/M_{FL} ima minimalnu vrijednost, pri čemu je je $M_{uc} = v_{uc} b d^2 (a/d)$, a v_{uc} definisano relacijama (5) i (6). M_{FL} je nominalni granični moment nosivosti presjeka pri čistom savijanju, koji nije u funkciji (a/d) .

U slučaju betona normalne čvrstoće dobija se izraz: U slučaju betona normalne čvrstoće dobija se relacija:

$$(a/d)_c = 10.69 (\rho / f_{ck})^{1/5}. \quad (7)$$

Za beton visoke čvrstoće važi relacija:

For high-strength concrete the following equation is valid:

$$(a/d)_c = 0.57 \cdot \frac{\rho^{0.19} f_{yl}^{0.41}}{f_{ck}^{0.05}} \quad (8)$$

Preovlađujući mehanizam dejstva se može identifikovati preko indeksa grednog dejstva I_b , koji je definisan kao $I_b = M_b / M_{uc}$. M_b je doprinos grednog dejstva graničnom momentu savijanja i predstavlja moment koji odgovara prvom sabirku izraza za v_{uc} . Tako je za beton normalne čvrstoće $M_b = b d^2 \xi 0.83 \rho^{1/3} f_{ck}^{1/2} (a/d)$. Za beton visoke čvrstoće je $M_b = b d^2 \xi 0.97 \rho^{0.46} f_{ck}^{1/2} (a/d)$.

Doprinos smičuće armature je dat jednačinama (9) i (11).

Za beton normalne čvrstoće

$$v_{si} = 1.67 I_b \rho_v f_{yv} \quad (9)$$

gdje je:

where:

where: $\xi = 1 / \sqrt{1 + d / (25d_a)}$;

f_{yv} = yield strength of the longitudinal reinforcement;

d_a = maximum aggregate size in concrete.

Equations for calculation of shear strength of reinforced concrete with shear reinforcement have been derived taking into account the assumption that stirrups contribute differently to shear strength depending on the contribution of arch and beam effects. For estimation of prevalent action, the critical value of span to depth ratio $(a/d)_c$ is analyzed. If $a/d < (a/d)_c$, which means that arch action prevails, the stirrup shear strength contribution is less than $\rho_v f_{yv}$. Otherwise, if $a/d > (a/d)_c$ beam action prevails, and the stirrup shear strength contribution is equal or greater $\rho_v f_{yv}$. Therefore, the contribution of stirrups to shear strength can be expressed as $v_{si} = \psi \rho_v f_{yv}$ where:

ρ_v – shear reinforcement ratio;

f_{yv} – yield stress of transverse reinforcement.

The value $(a/d)_c$ is determined from the condition that the relation M_{uc}/M_{FL} has minimal value, where $M_{uc} = v_{uc} b d^2 (a/d)$, while v_{uc} is defined through relations (5) and (6). M_{FL} is the ultimate nominal bending moment in pure flexure, which is independent of (a/d) .

In the case of the normal strength concrete the following expression is obtained:

The prevailing action can be identified through the beam action index I_b , defined as $I_b = M_b / M_{uc}$. M_b is the beam action contribution to the ultimate bending moment and represents a moment which corresponds to the first addend of the expression for v_{uc} . Therefore, for normal strength concrete it is $M_b = b d^2 \xi 0.83 \rho^{1/3} f_{ck}^{1/2} (a/d)$. For high strength concrete it is $M_b = b d^2 \xi 0.97 \rho^{0.46} f_{ck}^{1/2} (a/d)$.

The contribution of shear reinforcements is given by equations (9) and (11).

For normal strength concrete,

$$I_b = \frac{0.83\rho^{1/3}f_{ck}^{1/2}}{0.83\rho^{1/3}f_{ck}^{1/2} + 206.9\rho^{5/6} \left(\frac{a}{d}\right)^{-5/2}} \quad (10)$$

Za beton visoke čvrstoće

For high strength concrete,

$$v_{si} = 1.75I_b\rho_v f_{yv} \quad (11)$$

gdje je

where:

$$I_b = \frac{0.97\rho^{0.46}f_{ck}^{1/2}}{0.97\rho^{0.46}f_{ck}^{1/2} + 0.2\rho^{0.91}f_{ck}^{0.38}f_{yl}^{0.96} \left(\frac{a}{d}\right)^{-2.33}} \quad (12)$$

Jednačine uključene u analizu

Jednačine koje su predložili Kim D., Kim W. i Wight R. u [6], kao i jednačine koje je dao Russo sa ostalima [7], su primijenjene za dobijanje proračunskih vrijednosti nosivosti na smicanje za grede koje su ispitane u okviru eksperimentalnog istraživanja, sa ciljem da se utvrdi njihova saglasnost sa eksperimentalnim rezultatima. Ocjena saglasnosti je poslužila kao osnova za procjenu upotrebljivosti datih jednačina za proračun nosivosti za grede od betona visoke čvrstoće. Ocijenjena je i mogućnost njihove korekcije u cilju postizanja bolje saglasnosti sa eksperimentalnim rezultatima.

Jednačine za smičuću nosivost gređa sa smičućom armaturom, koje je dao Russo sa ostalima, su:

- za beton visoke čvrstoće:

$$v_u = \xi \left[0.97\rho^{0.46}f_{ck}^{1/2} + 0.2\rho^{0.91}f_{ck}^{0.38}f_{yl}^{0.96} \left(\frac{a}{d}\right)^{-2.33} \right] + 1.75 \cdot I_b \cdot \rho_v f_{yv} \quad (13)$$

- za beton normalne čvrstoće:

Equations Included in the Analysis

The equations predicted by Kim D., Kim W. i Wight R. in [6], as well as equations given by Russo and the others [7], have been applied to get calculation values of shear strength for beams which have been tested within the experimental research, with the aim to determine their concordance with experimental results. The evaluation of concordance served as the basis for evaluation of availability of the given equations for shear strength of high-strength concrete beams. Possibilities of their correction in order to achieve better concordance with the experimental results, are estimated, too.

Equations for shear strength, given by Russo and others, are as follows:

- for high strength concrete:

- for normal strength concrete:

$$v_u = \xi \left[0.83\rho^{1/3}f_{ck}^{1/2} + 206.9\rho^{5/6} \left(\frac{a}{d}\right)^{-5/2} \right] + 1.67 \cdot I_b \cdot \rho_v f_{yv} \quad (14)$$

Indeks grednog dejstva I_b u jednačini (13) je dat izrazom (12), dok u jednačini (14) I_b treba računati prema izrazu (10).

Jednačina (4), koju su formulisali Kim D., Kim W. i White R., namijenjena je za proračun nosivosti gređa bez smičuće armature, pa je za potrebe ove analize dopunjena dijelom za doprinos smičuće armature prema jednačinama koje je izveo Russo. Kako je jednačina (4) izvedena na bazi rezultata ispitivanja betona različitih čvrstoća ($f_{ck}=6\sim 109$ MPa), u analizi koja slijedi je primijenjena kako za beton normalne, tako i za beton visoke čvrstoće, dok je dio za doprinos smičuće armature usvojen prema jednačini Russo-a, pa se razlikuje za beton normalne i beton visoke čvrstoće. Ovim postupkom došlo se do jednačina (15) i (16), pri čemu su rezultati proračuna pomoću ovih jednačina označeni sa Kim-White.

Za beton visoke čvrstoće korišćena je jednačina:

The beam action index I_b in the equation (13) is given in the expression (12), while in the equation (14) I_b should be calculated according to the expression (10).

The equation (4) which was formulated by Kim D., Kim W. and White R., is predicted for shear strength of beams without stirrups, and for the needs of this analysis supplemented with the part for the contribution of shear reinforcement according to the equations derived by Russo. Since the equation (4) is derived based on the results of research of concretes of various strengths ($f_{ck}=6\sim 109$ MPa), in the analysis which follows it was applied both for the normal and high-strength concrete, while the part for shear reinforcement contribution was adopted according to Russo's equation, and is therefore different for normal and high-strength concrete. Through this proceeding, equations (15) and (16) were obtained, where results of calculations obtained through these equations are marked as Kim-White.

For high strength the following equation was used:

$$v_u = \frac{V_u}{bd} = 0.2(1 - \sqrt{\rho}) \left(\frac{d}{a} \right)^r \left[(f_{ck})^{0.5} + 1020 \rho^{0.9} \left(\frac{d}{a} \right)^{0.6} \right] + 1.75 l_b \rho_v f_{yv} \quad (15)$$

Za beton normalne vrstoće

For normal strength concrete the following equations was used

$$v_u = \frac{V_u}{bd} = 0.2(1 - \sqrt{\rho}) \left(\frac{d}{a} \right)^r \left[(f_{ck})^{0.5} + 1020 \rho^{0.9} \left(\frac{d}{a} \right)^{0.6} \right] + 1.67 l_b \rho_v f_{yv} \quad (16)$$

4 EKSPERIMENTALNI PROGRAM I REZULTATI TESTOVA

Rezultati eksperimentalnih ispitivanja, koja su obavljena na Građevinskom fakultetu u Podgorici, iskorišćeni su za analizu razmatranih jednačina. Eksperimentalno ispitivanje je obavljeno testiranjem dvadeset šest armiranobetonskih greda pod dejstvom koncentrisanog opterećenja u sredini raspona. Grede su izrađene kao parovi identičnih greda pri čemu je u svakom paru jedna greda izrađena od betona normalne čvrstoće (označena sa "N"), a druga od betona visoke čvrstoće (označena sa "H"). Detalji ispitanih greda prikazani su na slikama 3-6.

Pri ispitivanju su varirani sljedeći parametri:

- ukupna visina grede (h=18; 24; 30; 36 cm), na osnovu koje su definisane serije: H18-N18, H24-N24, H30-N30 i H36-N36;
- relativni raspon smicanja (a/d=2.67; 2.0; 1.5; 1.25);
- čvrstoća betona (karakteristična čvrstoća cilindra $f_{ck}=35\text{MPa}$ i $f_{ck}=90\text{MPa}$);
- najveći razmak poprečne armature (s=375; 200; 125 mm) ili nosivost poprečne armature ($\rho_w f_y = 0.443; 0.831; 1.330$ u MPa).

Koeficijent armiranja podužnom armaturom je prilagođen projektovanoj nosivosti grede, tako da do loma dođe usljed dejstva smicanja prije nego usljed savijanja ($\rho = 1.5 - 3.2\%$).

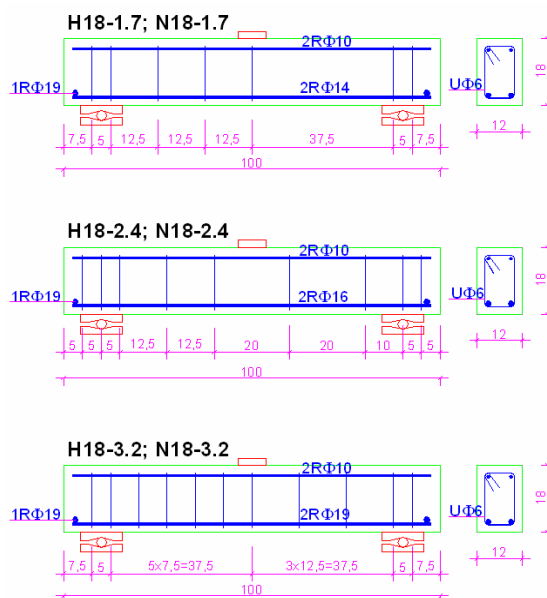
4 EXPERIMENTAL PROGRAM AND TEST RESULTS

Results of experimental researches, which have been done at the Faculty of Civil Engineering in Podgorica, were used for the analysis of the considered equations. Twenty six reinforced concrete beams were tested under concentrated loads at midspan. Beams are made as pairs of identical beams, where one is made of normal strength concrete (marked as "N") and the other is made of high strength concrete (marked as "H"). Specimen details are shown in Fig. 3-6.

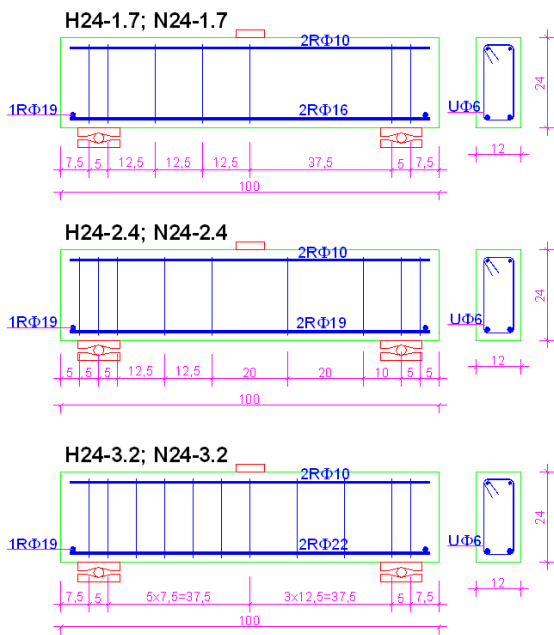
While researching, the following parameters were varied:

- overall depth (h=18; 24; 30; 36 cm), which represents series: H18-N18, H24-N24, H30-N30 i H36-N36;
- shear span to depth ratio (a/d=2.67; 2.0; 1.5; 1.25);
- compressive strength of concrete (characteristic compressive cylinder strength $f_{ck}=35\text{MPa}$ and $f_{ck}=90\text{MPa}$);
- the largest spacing of stirrups (s=375; 200; 125 mm) or shear reinforcement ratio ($\rho_w f_y = 0.443; 0.831; 1.330$ u MPa).

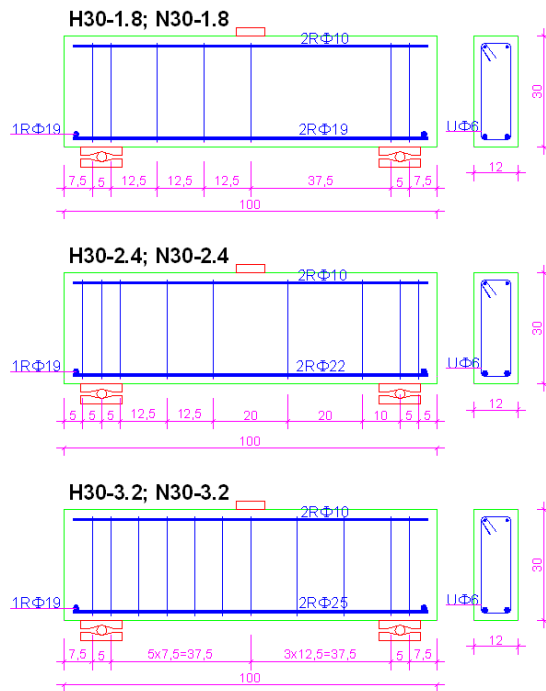
Longitudinal reinforcement ratio is adjusted to the designed strength of beams, so that the failure occurs owing to shear effects before than owing to bending ($\rho = 1.5 - 3.2\%$).



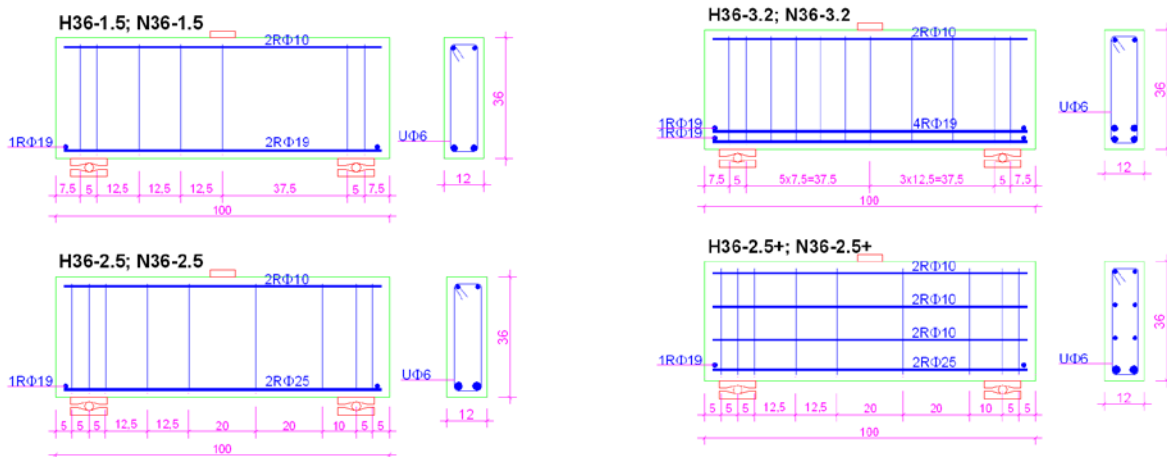
Slika 3 Grede iz serije H18-N18
Figure 3 Beams from the H18-N18 series



Slika 4 Grede iz serije H24-N24
Figure 4 Beams from H24-N24 series



Slika 5 Grede iz serije H30-N30
Figure 5 Beams from the H30-N30 series



Slika 6 Grede iz serije H36-N36
Figure 6 Beams from the H36-N36 series

U tabeli 1 dati su osnovni podaci o gredama: dimenzije poprečnog presjeka b/h , relativni raspon smicanja a/d , nosivost poprečne armature ($\rho_w f_y$) u MPa, proračunata za maksimalni razmak uzengija za datu gredu, kao i koeficijent armiranja podužnom armaturom (ρ). Pored toga, date su sile smicanja pri pojavi kose prsline, granične sile smicanja pri lomu, kao i njihov međusobni odnos.

U tabeli 2 prikazani su rezultati proračuna prema jednačinama (13) i (14), koje su označene sa „Russo“ i jednačinama (15) i (16), koje su označene sa „Kim-White“. Pored toga prikazane su numeričke vrijednosti odnosa graničnih sila loma pri testu i prema rezultatima

In the Table 1 the basic data on the beams, dimensions of cross section b/h , shear span to depth ratio a/d , shear reinforcement ratio ($\rho_w f_y$) in MPa, calculated for the largest spacing of stirrups for the given beam, as well as longitudinal reinforcement ratio (ρ) are shown. Apart from that, inclined cracking forces are given, shear forces at failure, as well as their correlation.

In the Table 2 results of the calculations according to equations (13) and (14), marked as "Russo" and equations (15) and (16), marked as "Kim-White" are shown. Apart from that, ratio of the test results to calculation results are shown as numerical values, and following statistical data for them are given as well:

proračuna, kao i statistički podaci: aritmetička sredina, standardna devijacija i koeficijent varijacije za ove numeričke vrijednosti.

average, standard deviation and coefficient of variation.

Tabela .1 Podaci o gredama, sile pri pojavi kosih prslina, sile loma i njihov međusobni odnos
Table 1 Data on beams, inclined cracking forces, failure shear forces and cracking to failure forces ratio

Opšti podaci o gredama					Beton visoke čvrstoće ($f_c=90$ MPa)				Beton normalne čvrstoće ($f_c=35$ MPa)			
b (mm)	h (mm)	a/d	$\rho_w f_y$ (MPa)	ρ (%)	Oznaka grede	$V_{cr,test}$ kN	$V_{u,test}$ kN	$\frac{V_{cr,test}}{V_{u,test}}$	Oznaka grede	$V_{cr,test}$ kN	$V_{u,test}$ kN	$\frac{V_{cr,test}}{V_{u,test}}$
120	180	2.67	(0.443)	1.7	H18-1.7	34.5	57.5	0,600	N18-1.7	22	54	0,407
120	180	2.67	0.831	2.2	H18-2.4	32	60	0,533	N18-2.4	27	50	0,540
120	180	2.67	1.330	3.2	H18-3.2	40	74	0,541	N18-3.2	32	71.5	0,448
120	240	2.0	(0.443)	1.7	H24-1.7	40	83.5	0,479	N24-1.7	30	61.5	0,488
120	240	2.0	0.831	2.4	H24-2.4	45	108.5	0,415	N24-2.4	36	89.5	0,402
120	240	2.0	1.330	3.2	H24-3.2	55	152.5	0,361	N24-3.2	40	115	0,348
120	300	1.5	(0.443)	1.8	H30-1.8	60	160	0,375	N30-1.8	50	110	0,455
120	300	1.5	0.831	2.4	H30-2.4	67.5	210	0,321	N30-2.4	52.5	175	0,300
120	300	1.5	1.330	3.2	H30-3.2	70	192	0,365	N30-3.2	52.5	199.5	0,263
120	360	1.25	(0.443)	1.5	H36-1.5	70	205	0,341	N36-1.5	50	135	0,370
120	360	1.25	0.831	2.5	H36-2.5	100	315	0,317	N36-2.5	70	200	0,350
120	360	1.25	0.831	2.5+0.8	H36-2.5+	100	337.5	0,296	N36-2.5+	80	220	0,364
120	360	1.33	1.330	3.2	H36-3.2	112.5	335	0,336	N36-3.2	70	225	0,311

Tabela 2 Rezultati proračuna prema analiziranim jednačinama i odnos mjerenih i računskih vrijednosti
Table2 Values calculated according to analyzed equations and measured to calculated results ratio

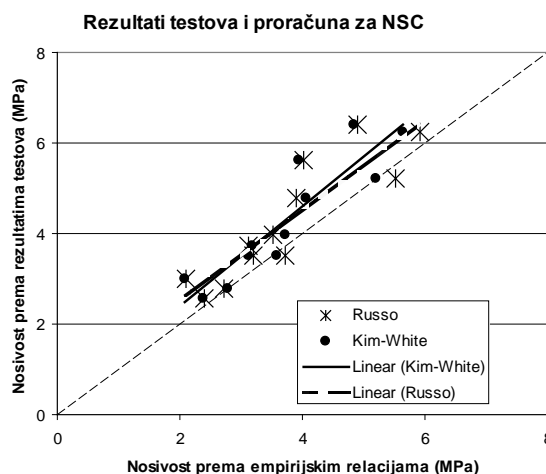
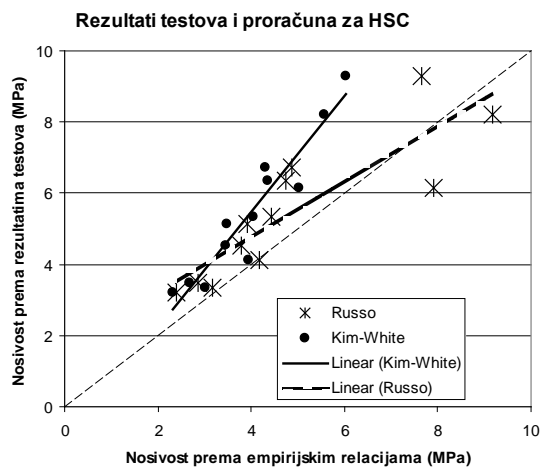
Beton visoke čvrstoće ($f_{ck}=90$ MPa)						Beton normalne čvrstoće ($f_{ck}=35$ MPa)					
Oznaka grede	a/d	$V_{u,Russo}$ (kN)	$V_{u,Kim-White}$ (kN)	$\frac{V_{u,test}}{V_{u,Russo}}$	$\frac{V_{u,test}}{V_{u,Kim-White}}$	Oznaka grede	a/d	$V_{u,Russo}$ (kN)	$V_{u,Kim-White}$ (kN)	$\frac{V_{u,test}}{V_{u,Russo}}$	$\frac{V_{u,test}}{V_{u,Kim-White}}$
H18-1.7	2.67	43.4	42.0	1.326	1.370	N18-1.7	2.67	37.7	37.3	1.433	1.448
H18-2.4	2.67	57.1	54.1	1.051	1.109	N18-2.4	2.67	48.9	49.9	1.022	1.002
H18-3.2	2.67	75.1	70.9	0.986	1.044	N18-3.2	2.67	63.4	67.0	1.127	1.067
H24-1.7	2.0	68.8	64.0	1.214	1.304	N24-1.7	2.0	57.4	57.1	1.071	1.077
H24-2.4	2.0	91.0	82.8	1.192	1.310	N24-2.4	2.0	74.8	76.2	1.197	1.175
H24-3.2	2.0	114.0	104.4	1.338	1.461	N24-3.2	2.0	93.7	97.4	1.227	1.181
H30-1.8	1.54	122.2	108.8	1.309	1.470	N30-1.8	1.54	99.9	97.5	1.101	1.128
H30-2.4	1.54	152.0	134.5	1.381	1.561	N30-2.4	1.54	125.4	123.0	1.396	1.422
H30-3.2	1.54	246.6	156.9	0.779	1.223	N30-3.2	1.54	153.0	150.8	1.304	1.323
H36-1.5	1.25	170.4	155.0	1.203	1.322	N36-1.5	1.25	142.8	137.5	0.946	0.982
H36-2.5	1.25	352.4	214.2	0.894	1.470	N36-2.5	1.25	211.9	199.9	0.944	1.000
H36-3.2	1.33	275.9	217.1	1.214	1.543	N36-3.2	1.33	213.2	202.8	1.056	1.109
Aritmetička sredina X_{sr}				1.16	1.35	Aritmetička sredina X_{sr}				1.15	1.16
Standardna devijacija S				0.19	0.16	Standardna devijacija S				0.16	0.16
Koeficijent varijacije v (%)				16	12	Koeficijent varijacije v (%)				14	14

Na slici 7 je prikazan je odnos nominalnih napona smicanja pri lomu, određenih pri eksperimentalnom ispitivanju i primjenom navedenih empirijskih jednačina. Data je linija linearne interpolacije rezultata za svaku jednačinu pojedinačno. Na taj način je ocjena saglasnosti rezultata testova i rezultata proračuna učinjena jasnijom. Kod greda od betona visoke čvrstoće saglasnost je manja, pri čemu relacija Russo-a postaje nekonzervativna za grede veće nosivosti, koje su u ovom slučaju sa manjim odnosom a/d. Linije kojima su apro-

Figure 7 shows the correlation of nominal shear stresses at failure, determined in the experimental research and through application of analyzed equations. Line of linear interpolation of results for every equation individually is given. In that way, the estimation of concordance of test and calculation results is made clearer. In the case of high-strength concrete beams, concordance is smaller, while Russo relation becomes non-conservative for beams of higher shear strength, which in this case have smaller shear span to depth ratio

ksimirani rezultati za beton normalne čvrstoće su paralelne sa referentnom linijom i pokazuju bolju saglasnost nego u slučaju betona visoke čvrstoće.

a/d. Lines by which the results of normal-strength concrete were approximated are parallel with the referent line and show better concordance than in the case of high-strength concrete.



Slika 7 Odnos eksperimentalnih rezultata i rezultata proračuna nosivosti na smicanje
Figure 7 Correlation of measured and calculated values of shear strength

5 IZVOĐENJE INOVIRANIH JEDNAČINA

Pri izvođenju inoviranih jednačina za proračun smičuće nosivosti greda od betona visoke čvrstoće pretpostavljeno je da se korekcijom proračunske jednačine (15), u dijelu empirijski određenih konstanti, može doći do jednačine za proračun smičuće nosivosti greda koja ima bolju saglasnost sa eksperimentalnim rezultatima. Za definisanje novih konstanti, u jednačini za proračun smičuće nosivosti, primijenjena je regresiona analiza na bazi eksperimentalnih rezultata, korišćenjem kompjuterskog programa Curve Expert.

Početne vrijednosti su definisane na bazi rezultata sopstvenih eksperimentalnih ispitivanja, pri čemu su uključeni osnovni parametri a/d , f_{ck} i ρ , a zatim su urađene korekcije koje obuhvataju uticaj visine presjeka d kao parametar ("size effect"), ograničenje vrijednosti ρ (koeficijenta armiranja podužnom armaturom) i doprinos smičuće armature. U ovom dijelu analize su korišćeni rezultati opisanih eksperimentalnih istraživanja, kao i rezultati drugih autora koji se nalaze u bazi podataka formiranoj za potrebe istraživanja datoj u [8].

Nosivost na smicanje betonskog dijela presjeka

Za definisanje nosivosti na smicanje betonskog dijela presjeka odabrana je jednačina oblika:

$$v_{uc} = 0.2 \left(\frac{d}{a} \right)^r \left[(f_{ck})^{0.5} + m\rho^{0.9} \left(\frac{d}{a} \right)^k \right] \quad (17)$$

U datoj jednačini eksponent r predstavljen je funkcijom oblika $r=(d/a)^k\rho^{-d.1}$. Prva aproksimacija nosivosti

5 DERIVING INNOVATIVE EQUATIONS

While deriving innovative equations for the calculation of shear strength of high-strength concrete beams it is supposed that by correction of equation (15), in the part of empirically determined constants, the equation for calculation of shear strength, which is more in concordance with experimental results, can be obtained. For defining new constants, in the equation for calculation of shear strength, regression analysis based on experimental results was applied, using the computer program Curve Expert.

Starting values are defined based on the results of independent experimental researches, where basic parameters a/d , f_{ck} and ρ are included, after which corrections were made comprising the influence of depth of d as a parameter ("size effect"), restriction of the value of ρ (longitudinal reinforcement ratio) and contribution of transverse reinforcement. In this part of analysis results of specified experimental researches were used, as well as results of other authors which may be found in the data base formed for the needs of the research given in [8].

Shear Strength Provided by Concrete

For defining resisting contribution provided by concrete to shear strength of reinforced concrete beam, the following equation was chosen:

In the given equation power r is represented by the function $r=(d/a)^k\rho^{-d.1}$. The first approximation of resisting

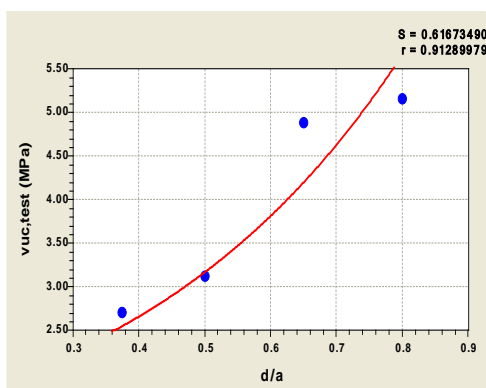
na smicanje betonskog dijela presjeka definisana je korišćenjem rezultata opisanih istraživanja. Korišćeni su rezultati za grede kod kojih je koeficijent armiranja podužnom zategnutom armaturom iznosio $\rho=0.015-0.018$ (za proračun je korišćena vrijednost 0.015). Analiza važi za beton visoke čvrstoće ($f_{ck}=90$ MPa).

Za regresionu analizu je zadata funkcionalna zavisnost oblika:

$$v_{uc} = 0.2x^{1.5x^k} (9.5 + k_1x^k) \quad (18)$$

Promjenljiva x u relaciji predstavlja parametar d/a , dok su k i k_1 konstante koje treba odrediti pomoću regresione analize. Analogija između izraza (17) i (18) daje: $k_1=m\rho^{0.9}$; $(f_{ck})^{0.5}=9.5$, $r=1.5(d/a)^k$. Numeričke vrijednosti koje figurišu u jednačini (18) su dobijene za zadate vrijednosti: $\rho=0.015$ i $f_{ck}=90$ MPa, odnosno $\rho^{-1}=1.5$. Eksperimentalne vrijednosti smičuće nosivosti $v_{uc}=V_{uc,test}/bd$, koje su korišćene kao ulazni podaci za regresionu analizu, dobijene su tako što su sile smičuće nosivosti određene eksperimentalnim putem $V_{u,test}$ umanjene za doprinos poprečne armature V_{us} , koji je određen primjenom Russo jednačine (11).

Regresionom analizom definisana je kriva u obliku izraza (18), koju karakteriše standardna greška $S=0.617$ MPa i koeficijent korelacije: $r=0.913$. Dobijene su vrijednosti: $k=0.86$ i $k_1=33.8$. Kako je $k_1=m\rho^{0.9}$ i $\rho=0.015$, to je $m=1480$.



Slika 8. Kriva dobijena regresionom analizom za $\rho=0.015$
Figure 8 The curve obtained by regression analysis for $\rho=0.015$

Za sljedeću aproksimaciju je u jednačini (17) usvojeno $k=0.86$ i $r=1.45(d/a)^{0.86}$, dok je k_1 nepoznati parametar. Primjenom tako prilagođene jednačine izvršena je regresiona analiza eksperimentalnih rezultata za grede kod kojih koeficijent armiranja podužnom armaturom iznosi $0.023-0.026$. Vrijednosti za proračun su:

$$\rho=0.024, f_{ck}=90 \text{ MPa}, \text{ i } \rho^{-1}=1.45.$$

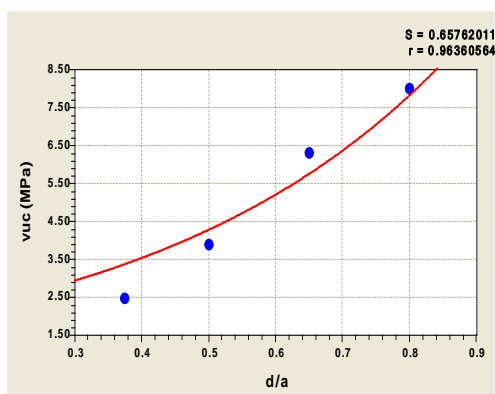
U ovom slučaju je definisana kriva sa standardnom greškom $S=0.658$ MPa, i koeficijentom korelacije $r=0.964$, prikazana na slici 9. Određen je parametar $k_1=50.6=m\rho^{0.9}$, pa je $m=1452$.

contribution provided by concrete is defined by using results of the specified researches. The results for beams in which the longitudinal reinforcement ratio amounted to $0.015-0.018$ were used (the value $\rho=0.015$ was used for the calculation). Analysis is valid for high-strength concrete ($f_{ck}=90$ MPa).

For the regression analysis the functional dependence in the following form is given:

Variable x in the relation represents the parameter d/a , while k and k_1 represent constants which should be defined using regression analysis. The analogy between the expressions (17) and (18) gives: $k_1=m\rho^{0.9}$; $(f_{ck})^{0.5}=9.5$, $r=1.5(d/a)^k$. Numerical values which appear in the equation (18) are obtained for the given values: $\rho=0.015$, $f_{ck}=90$ MPa, and $\rho^{-1}=1.5$. Experimental values of the shear strength $v_{uc}=V_{uc,test}/bd$, which were used as the entering data for regression analysis, are obtained by subtracting the forces of transverse reinforcement contribution according to Russo equation (11) V_{us} , from experimentally failure shear forces $V_{u,test}$.

Using regression analysis, the curve from the expression (18) was obtained, which is characterized by standard error $S=0.617$ MPa and correlation coefficient $r=0.913$. Values $k=0.86$ and $k_1=33.8$ were got. Since $k_1=m\rho^{0.9}$ i $\rho=0.015$, then $m=1480$.



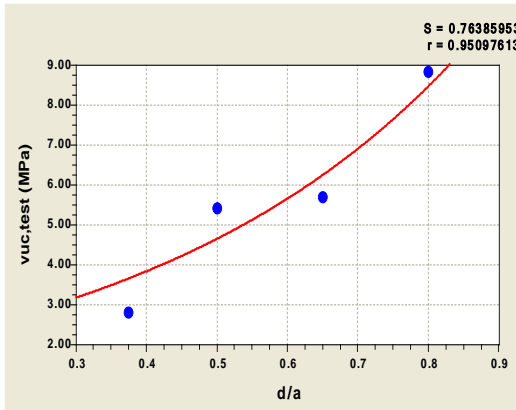
Slika 9 Kriva dobijena regresionom analizom za $\rho=0.024$
Figure 9 The curve obtained by regression analysis for $\rho=0.024$

For the following approximation in the equation (17) it is adopted $k=0.86$ and $r=1.45(d/a)^{0.86}$, while k_1 is an unknown parameter. By using thus adapted equation regression analysis of experimental results for beams for which longitudinal reinforcement ratio amounts to $0.023-0.026$ is performed. The values for the calculation are as follows:

$$\rho=0.024, f_{ck}=90 \text{ MPa}, \text{ i } \rho^{-1}=1.45.$$

In this case the curve with standard error $S=0.658$ MPa, and the correlation coefficient $r=0.964$, is defined, as shown in Fig. 9. The parameter $k_1=50.6=m\rho^{0.9}$, is obtained, so $m=1452$.

Za grede kod kojih je $\rho=0.032$, slično kao u prethodnom slučaju dobijena je kriva na slici 10.



Slika 10 Kriva dobijena regresionom analizom za $\rho=0.032$
Figure 10 The curve obtained by regression analysis for $\rho=0.032$

Standardna greška dobijene krive je $S=0.764$ MPa, dok je koeficijent korelacije $r=0.951$. Određen je parametar $k_1=55.1=m\rho^{0.9}$, pa je $m=1220$.

Na osnovu rezultata regresione analize definisana je jedinstvena jednačina koja obuhvata sva tri analizirana slučaja. Jedinstvena vrijednost za konstantu m je usvojena kao aritmetička sredina od tri dobijene vrijednosti, odnosno $m=1380$. Dobijena jednačina je:

$$v_{uc} = 0.2(1 - \sqrt{\rho}) \left(\frac{d}{a} \right)^r \left[(f_{ck})^{0.5} + 1380\rho^{0.9} \left(\frac{d}{a} \right)^{0.86} \right] \quad (19)$$

Jednačina (19) za grede visine $d>500$ mm daje nekonzervativne rezultate. Da bi se dobila jednačina za proračun koja je prihvatljiva za elemente veće visine, potrebno je u izraze za proračun nosivosti na smicanje uključiti efekat veličine kao parametar, [2]. U cilju uključivanja ovog parametra u proračunsku jednačinu urađena je dodatna regresiona analiza i određen korekcionni faktor ξ koji obuhvata uticaj veličine elementa koristeći visinu poprečnog presjeka d . Za analizu su korišćene vrijednosti $v_{uc,test}/v_{uc,rač}$ u zavisnosti od d . Primjenom regresione analize definisana je sljedeća zavisnost:

$$\xi = k_1 e^{kd}$$

Dobijaju se parametri:

$$k_1=1.1$$

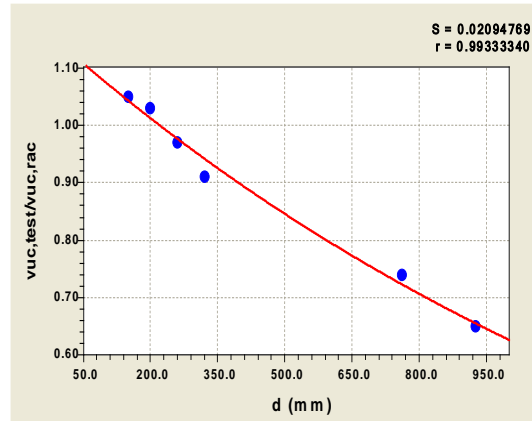
$$k=-0.000598 \approx -1/1700$$

Standardna greška je $S=0.021$ MPa, dok je koeficijent korelacije $r=0.993$.

$$\text{Usvojena je funkcija: } \xi = 1.1 e^{-\frac{d}{1700}}$$

Sila smicanja koju prihvata betonski dio presjeka sa podužnom armaturom, ako je u gredi prisutna minimalna smičuća armatura, je:

For the beams for which $\rho=0.032$, similarly as in the previous case, the curve in Fig. 10 was obtained.



Slika 11 Regresiona kriva za "size effect"
Figure 11 Regression curve for "size effect"

The standard error of the obtained curve is $S=0.764$ MPa, while the correlation coefficient is $r=0.951$. The parameter $k_1=55.1=m\rho^{0.9}$ is defined, so $m=1220$.

Based on the results of regression analysis the unique equation which comprises all three analyzed cases is defined. The unique value for the constant m is adopted as average of the three obtained values, or $m=1380$. The obtained equation is:

The equation (19) for the beams with the depth $d>500$ mm gives non-conservative results. In order to obtain the design equation that is reasonable for elements with higher depth, size effect as parameter should be included in expressions for shear strength calculation, [2]. Added regression analysis was done and correction factor ξ , which comprises size effect using cross-section depth d , was defined with the aim to include this parameter in design equation. Values of ratio $v_{uc,test}/v_{uc,rač}$, in dependent of d , are used for analysis. Using the regression analysis, the following dependence is defined:

$$\xi = k_1 e^{kd}$$

Follow parameters are get:

$$k_1=1.1$$

$$k=-0.000598 \approx -1/1700$$

Standard error is $S=0.021$ MPa, while correlation coefficient is $r=0.993$.

$$\text{Adopted formula is: } \xi = 1.1 e^{-\frac{d}{1700}}$$

Shear resisting force provided by concrete part in the case of reinforced beam with contribution of longitudinal reinforcement is:

$$V_{uc} = 0.2\xi(1-\sqrt{\rho})\left(\frac{d}{a}\right)^r \left[(f_{ck})^{0.5} + 1380\rho^{0.96} \left(\frac{d}{a}\right)^{0.86} \right] bd \quad (20)$$

Pri tome je:

$\xi = 1.1e^{-\frac{d}{1700}}$ - korekcionni faktor za efekat veličine;

$$r = \left(\frac{d}{a}\right)^{0.86} \cdot \rho^{-0.1};$$

$$\rho = \frac{A_{sl}}{bd} \leq 0.02 \left(1 + \frac{f_{ck}}{100}\right), [3];$$

A_{sl} - površina poprečnog presjeka podužne zategnute armature usidrene na odgovarajući način;

$f_{ck} > 50$ MPa - karakteristična čvrstoća betona pri pritisku mjerena na cilindru;

d - statička visina presjeka (mm);

b - minimalna širina poprečnog presjeka (mm).

Ako je $\frac{a}{d} \leq 0.8$, usvaja se $\frac{d}{a} = 1.25$.

Jednačina (20) je iskorišćena za proračun nosivosti na smicanje eksperimentalno ispitanih greda i rezultati su upoređeni sa rezultatima dobijenim u eksperimentalnom ispitivanju. Za proračun doprinosa smičuće armature upotrebljena je jednačina koju je dao Russo, a koja je već primjenjivana u kombinaciji sa Kim-White jednačinom. Rezultati su prikazani na slici 12. Evidentno je da jednačina (20) daje bolje rezultate nego jednačine koje predlažu Russo i Kim-White. S obzirom da je doprinos smičuće armature u sva tri slučaja proračunat prema jednačini Russo-a, različiti rezultati su uslovljeni razlikama u proračunu doprinosa betonskog dijela presjeka nosivosti na smicanje.

Where:

$\xi = 1.1e^{-\frac{d}{1700}}$ - size effect reduction factor;

$$r = \left(\frac{d}{a}\right)^{0.86} \cdot \rho^{-0.1};$$

$$\rho = \frac{A_{sl}}{bd} \leq 0.02 \left(1 + \frac{f_{ck}}{100}\right), [3];$$

A_{sl} - cross section area of longitudinal tension reinforcement that has adequate anchorage;

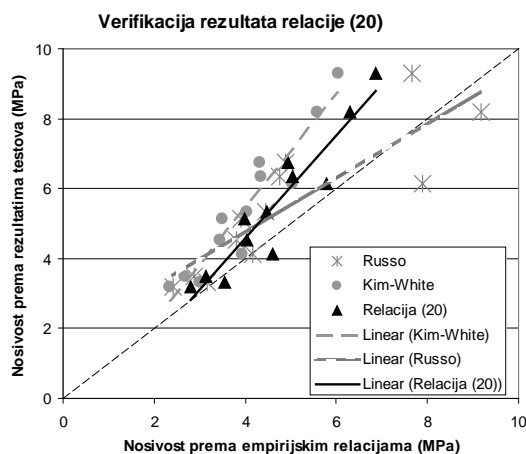
$f_{ck} > 50$ MPa - characteristic compressive cylinder strength of concrete;

d - effective depth of cross-section (mm);

b - minimal width of cross-section (mm).

If $\frac{a}{d} \leq 0.8$, it is adopted that $\frac{d}{a} = 1.25$.

The equation (20) is used for the calculation of shear strength of experimentally tested beams and the results are compared with the results obtained in the experimental research. For the calculation of shear reinforcement contribution the equation given by Russo, which is already used in the combination with Kim-White equation, is applied. The results are shown in Fig. 12. It is evident that the equation (20) gives better results than the equations suggested by Russo and Kim-White. Since the contribution of transverse reinforcement in all three cases is calculated according to Russo's equation, different results are conditioned by differences in calculation of the shear resisting contribution provided by concrete.



Slika 12 Rezultati proračuna primjenom jednačine (20) u odnosu sa rezultatima testova
Figure 12 Results of the calculation applying equation (20) in correlation to test results

Važno je konstatovati da se izvedena jednačina (20) primjenjuje za proračun doprinosa betonskog dijela presjeka sa podužnom armaturom ukupnoj nosivosti na smicanje, za grede koje imaju smičuću armaturu. Za grede koje su u potpunosti bez smičuće armature, kakve su eksperimentalno ispitivali pojedini autori, primjenom jednačine (20) dobijaju se nekonzervativni rezultati, [8].

It is important to conclude that the derived equation (20) is applied for the calculation of resisting contribution provided by concrete with longitudinal reinforcement, for the beams which have transverse reinforcement. For the beams which do not contain transverse reinforcement at all, such as the ones experimentally tested by certain authors, by application of the equation (29) non-conservative results are obtained, [8].

Doprinos smičuće armature

Za proračun nosivosti smičuće armature usvojena je jednačina prema obliku slična jednačini koju je dao Russo. Nosivost smičuće armature je iskazana u funkciji indeksa grednog dejstva, koeficijenta armiranja poprečnom armaturom i granice razvlačenja ove armature. Na osnovu sprovedenih istraživanja zaključeno je da efikasnost smičuće armature zavisi od vitkosti grede. Zbog toga je u jednačinu za proračun doprinosa smičuće armature uključen faktor koji je u funkciji d/a . Preko ovog faktora se obuhvata uticaj vitkosti. Uključivanje parametra d/a u inoviranu jednačinu za doprinos smičuće armature, čini je bitno različitom od jednačine koju je dao Russo. Nova jednačina je oblika:

$$V_{us} = k I_n \rho_v f_{yv} \quad (21)$$

gdje je:

$$I_n = \frac{(f_{ck})^{0.5}}{(f_{ck})^{0.5} + 1380 \rho^{0.9} \left(\frac{d}{a}\right)^{0.86}} - \text{indeks grednog}$$

dejstva;

$$\rho_v = \frac{A_{sv}}{bs} - \text{koeficijent armiranja smičućom}$$

armaturom (A_{sv} = površina poprečnog presjeka smičuće armature; s = osovinsko rastojanje uzengija);

f_{yv} - granica razvlačenja smičuće armature.

Parametar k u jednačini (21) je definisan u funkciji d/a primjenom regresione analize. Ulazni podaci za regresionu analizu su dobijeni na sljedeći način: eksperimentalno utvrđene sile loma su iskazane u obliku zbira $V_{u, test} = V_{uc} + V_{us}$; primjenom jednačine (20) su proračunate sile V_{uc} , dok su vrijednosti za k određene iz relacije $V_{us} = k I_n \rho_v f_{yv} b d$. Dobijene vrijednosti za k su iskorišćene za regresionu analizu pomoću koje se došlo do tražene zavisnosti $k = f\left(\frac{d}{a}\right)$. Jednačina je definisana na dva načina: u obliku eksponencijalne funkcije i u obliku linearne funkcije.

Primjenom regresione analize za krivu u obliku eksponencijalne funkcije, $k = k_1 e^{k_2 \frac{d}{a}}$, određeni su nepoznati parametri:

$$k_1 = 0.8$$

$$k_2 = 3.3$$

Standardna greška je $S = 1.616$, a koeficijent korelacije $r = 0.884$.

Izraz za k u eksponencijalnom obliku:

$$k = 0.8 e^{3.3 \frac{d}{a}} \quad (22)$$

Iako je utvrđeno da se pomoću eksponencijalne funkcije dobija bolja aproksimacija eksperimentalnih rezultata, nego za linearnu zavisnost, utvrđeno je da eksponencijalna funkcija za $d/a > 0.8$ može dati nekonzervativne rezultate. Zbog toga je usvojena

Calculation of the Transverse Reinforcement Contribution

For the calculation of the shear strength provided by transverse reinforcement the equation similar in form to the one given by Russo is adopted. This shear strength is in dependence of the beam action index, transverse reinforcement ratio and yield strength of this reinforcement. Based on the conducted researches, it is concluded that the efficiency of the transverse reinforcement depends on the slenderness of the beam. Therefore the factor which is dependent of d/a is included into the equation for the calculation of the contribution of transverse reinforcement. Through this factor the influence of slenderness is comprised. Including the parameter d/a in the innovative equation for the contribution of transverse reinforcement, makes it significantly different than the equation given by Russo. The new equation has the following form:

where:

$$I_n = \frac{(f_{ck})^{0.5}}{(f_{ck})^{0.5} + 1380 \rho^{0.9} \left(\frac{d}{a}\right)^{0.86}} - \text{beam action}$$

index;

$$\rho_v = \frac{A_{sv}}{bs} - \text{transverse reinforcement ratio } (A_{sv} =$$

transverse reinforcement cross-section area; s = space between stirrups);

f_{yv} - yielding strength of transverse reinforcement.

The parameter k in the equation (21) is defined in dependence of d/a applying regression analysis. The input data for regression analysis are obtained as follows: experimentally determined forces at shear failure are expressed as the sum $V_{u, test} = V_{uc} + V_{us}$; applying the equation (20) forces V_{uc} are calculated, while the values from k are determined from the relation $V_{us} = k I_n \rho_v f_{yv} b d$. The obtained values for k are used for the regression analysis through which it is arrived at the requested dependency $k = f\left(\frac{d}{a}\right)$. The equation is defined in two ways: with the exponential fit and with the linear fit.

Applying regression analysis for the curve in the form

of exponential function $k = k_1 e^{k_2 \frac{d}{a}}$, the unknown parameters are determined:

$$k_1 = 0.8$$

$$k_2 = 3.3$$

The standard error is $S = 1.616$, and the correlation coefficient is $r = 0.884$.

The expression for k with the exponential fit:

Although it is determined that through exponential function better approximation of the experimental researches is obtained, than for the linear function, it is found that the exponential function for $d/a > 0.8$ can give non-conservative results. Therefore, the dependency

zavisnost u obliku linearne funkcije promjenljive

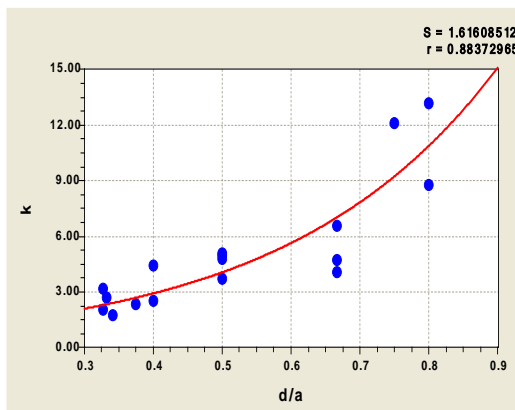
$$d/a: k = k_1 + k_2 \frac{d}{a}$$

Rezultati regresione analize:

$$k_1 = -0.7$$

$$k_2 = 10$$

Standardna greška je $S=1.00$, a koeficijent korelacije $r=0.822$.



Slika 13 Regresiona kriva za parametar k u obliku eksponencijalne funkcije
Figure 13 Regression curve with the exponential fit

Jednačina u obliku linearne zavisnosti dobijena pomoću regresione analize je:

$$k = 10 \frac{d}{a} - 0.7 \quad (23)$$

Utvrđena linearna zavisnost u slučaju kad je $d/a < 0.5$ daje veće vrijednosti koeficijenta k nego eksponencijalna funkcija. Zbog toga je linearna funkcija dodatno korigovana, tako da konačno usvojena linearna zavisnost za parametar k glasi:

$$k = 10 \frac{d}{a} - 1.5 \quad (24)$$

Iz cjelokupne analize proizilaze sljedeće jednačine za proračun nosivosti na smicanje za grede od betona visoke čvrstoće sa smičućom armaturom:

$$V_u = V_{uc} + V_{us} = 0.2\xi(1-\sqrt{\rho})\left(\frac{d}{a}\right)^r \left[(f_{ck})^{0.5} + 1380\rho^{0.9} \left(\frac{d}{a}\right)^{0.86} \right] bd + 0.8e^{3.3\frac{d}{a}} I_n \rho_V f_{yV} bd \quad (25)$$

$$V_u = V_{uc} + V_{us} = 0.2\xi(1-\sqrt{\rho})\left(\frac{d}{a}\right)^r \left[(f_{ck})^{0.5} + 1380\rho^{0.9} \left(\frac{d}{a}\right)^{0.86} \right] bd + \left(10\frac{d}{a} - 1.5\right) I_n \rho_V f_{yV} bd \quad (26)$$

U jednačinama (25) i (26) su parametri ξ , r i ρ definisani na isti način kao u jednačini (20). Valjanost novih proračunskih jednačina (25) i (26) je ocijenjena preko odnosa rezultata testova i proračuna, koji su prikazani na slici 15.

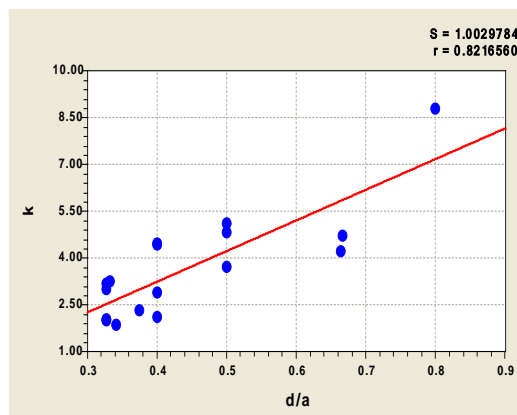
with the linear fit of the variable d/a : $k = k_1 + k_2 \frac{d}{a}$ is adopted.

Results of the regression analysis:

$$k_1 = -0.7$$

$$k_2 = 10$$

The standard error is $S=1.00$, and the correlation coefficient is $r=0.822$.



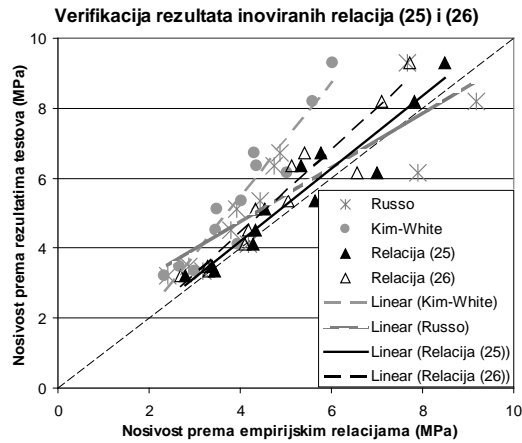
Slika 14 Regresiona kriva za k u obliku prave
Figure 14 Regression curve with the linear fit

The equation with the linear fit obtained using regression analysis is:

The determined linear dependency in the case when $d/a < 0.5$ gives greater values of the parameter k than the exponential function. Therefore, the linear function is additionally corrected, so the finally adopted linear dependency for the parameter k is:

From the overall analysis the following equations for the calculation of shear strength of high-strength concrete reinforced beams with transverse reinforcement

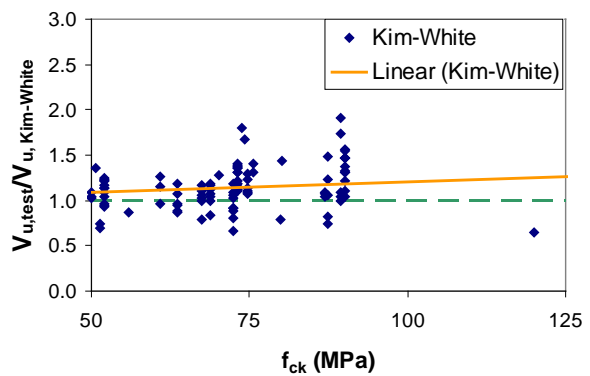
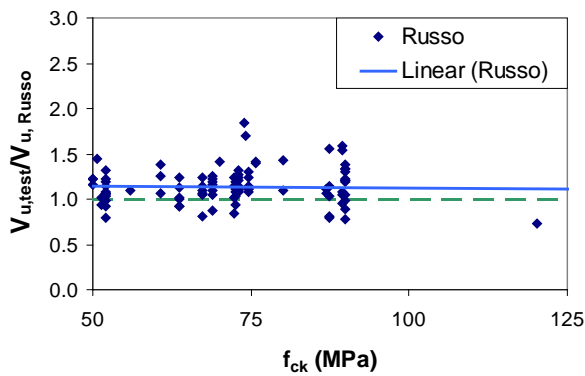
In the equations (25) and (26) the parameters ξ , r i ρ are defined in the same way as in the equation (20). Validity of the new design equations (25) and (26) is estimated through the comparison of the tests results and calculations shown in Fig. 15.



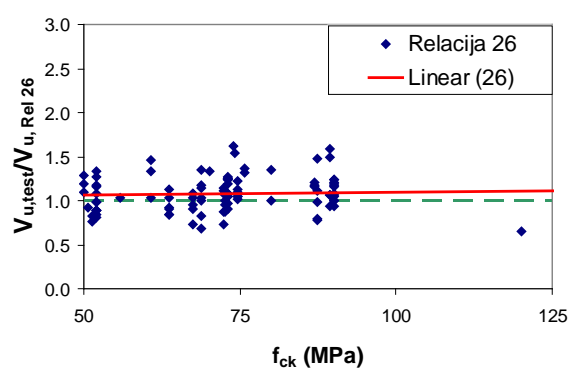
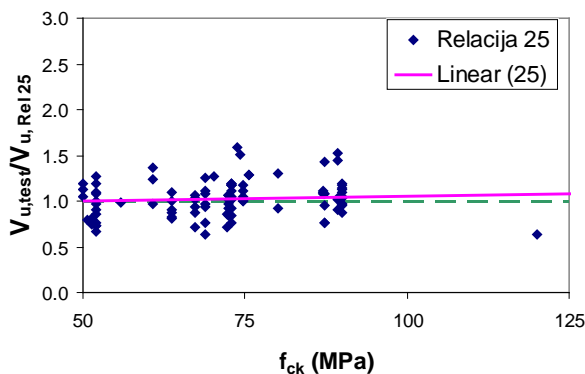
Slika 15. Rezultati proračuna primjenom relacija (25) i (26) u odnosu sa rezultatima eksperimenata
 Figure 15 Comparison of the tests results with the results calculated by application by the equations (25) and (26)

Rezultati dobijeni primjenom jednačina (25) i (26), prikazani na dijagramu na slici 15, pokazuju bolju saglasnost sa eksperimentalnim rezultatima od analiziranih jednačina "Kim-White" i "Russo".

The results obtained through the application of the equations (25) and (26) given in the diagram [Fig. 15], show better concordance with test results than the analyzed equations "Kim-White" and "Russo".



Slika 16 Odnos eksperimentalnih rezultata i rezultata proračuna za jednačine Russo-a i Kim-White-a
 Figure 16 Calculation results according equations of Russo and Kim-White to experimental results ratio



Slika 17 Odnos eksperimentalnih rezultata i rezultata proračuna prema jednačinama (25) i (26)
 Figure 17 Calculation results according equations (25) and (26) to experimental results ratio

Dodatna potvrda valjanosti predloženih jednačina je data putem dijagrama koji prikazuju vrijednosti odnosa rezultata testova i rezultata proračuna, u funkciji čvrstoće betona pri pritisku, dobijenih iz podataka o rezultatima ispitivanja za 102 grede, koji su dati u [8].

6 ZAKLJUČAK

Na ponašanje armiranobetonskih greda pri smičućem lomu utiče veliki broj parametara koje treba obuhvatiti rješenjem za proračun smičuće nosivosti. Zbog toga se rješenja daju u obliku empirijskih jednačina. Intenzivna istraživanja ovog problema rezultirala su većim brojem različitih empirijskih jednačina, pri čemu se neke od njih koriste u okviru aktuelnih proračunskih kodova.

Postojeće empirijske jednačine su uglavnom definisane na osnovu rezultata ispitivanja betona čija čvrstoća pri pritisku ne prelazi 40 MPa, pa je njihova upotreba ograničena na betone niže i srednje čvrstoće.

Nova istraživanja iz oblasti betona visoke čvrstoće ($f_{ck} > 50$ MPa), pokazala su da se smičuća nosivost greda ne uvećava značajno sa povećanjem čvrstoće betona. Uticaj pojedinih parametara smičuće nosivosti, se razlikuje zavisno od čvrstoće betona. Zbog toga je za beton visoke čvrstoće potrebno redefinisati postojeće jednačine.

Parametri koji su uključeni u inovirane jednačine za proračun smičuće nosivosti su: čvrstoća betona pri pritisku, koeficijent armiranja podužnom armaturom, relativni raspon smicanja i korekcionni faktor za efekat veličine. Jednačine za proračun su definisane u obliku zbira doprinosa betonskog dijela presjeka i doprinosa smičuće armature.

Pri definisanju inoviranih jednačina usvojen je stav da se doprinos betonskog dijela presjeka, kod greda koje imaju najmanje minimalnu smičuću armaturu, ne može smatrati ekvivalentnim sa nosivošću greda koje imaju samo podužnu armaturu. Međudejstvo podužne i smičuće armature predstavljaju značajan faktor u prenosu smičućih sila, pa je neophodno razmatrati njihovo dejstvo kao cjelinu.

Doprinos smičuće armature, u inoviranim jednačinama, uključuje dodatne faktore: efekat vitkosti grede u funkciji d/a i indeks grednog dejstva.

Verifikacija rezultata proračuna primjenom inoviranih jednačina, izvršena na bazi rezultata ispitivanja 102 grede od betona visoke čvrstoće, pokazuje dobru saglasnost proračunskih rezultata sa rezultatima testova i veću uniformnost rezultata nego kod polaznih jednačina. Relativno malo rasipanje rezultata koje daju predložene jednačine omogućava definisanja dovoljno pouzdanih proračunskih modela uz uvođenje zahtijevanog stepena sigurnosti.

The additional confirmation of the validity of the suggested equations is given through the diagrams which show the values of the test results to calculation results ratio, in dependence of the compressive strength of concrete, obtained from the data on the results of the researches for 102 beams, given in [8].

6 CONCLUSION

The behavior of reinforced concrete beams at shear failure is influenced by a great number of parameters which should be comprised by the solution for the calculation of shear strength design. Therefore, the solutions are given in the form of empirical equations. Intensive researches of this problem resulted in a large number of different empirical equations, and some of them are used within current design codes.

The existing empirical equations are mainly defined based on the results of the research of concrete whose compressive strength does not go over 40 MPa, so their usage is limited to the concretes of lower and medium strength.

New researches in the area of high strength concrete ($f_{ck} > 50$ MPa) showed that shear strength does not grow significantly when the strength of concrete is increasing. The influence of certain parameters of shear strength is different depending on the strength of concrete. Therefore, for the high-strength concrete, it is necessary to redefine the existing equations.

The parameters included in the innovative empirical equations for the calculation of shear strength are the following: compressive strength of concrete, longitudinal reinforcement ratio, shear span to depth ratio and size effect reduction factor. The equations for the calculation are defined in the form of the sum of the resisting contribution provided by concrete and contribution provided by transverse reinforcement.

While defining innovative equations the attitude was adopted that the resisting contribution provided by concrete, in case of the beams which have at least minimal transverse reinforcement, can not be considered equivalent to the shear resistance of the beams which have only longitudinal reinforcement. Interaction of the longitudinal and transverse reinforcement represents a significant factor in the transfer of shearing forces, so it is necessary to study their effect as a whole.

The contribution of the transverse reinforcement, in the innovative equations, includes the additional factors: the effect of the slenderness of beam in dependence of d/a and beam action index.

Verification of the calculation results applying innovative equations, performed on the basis of the results of the research of 102 beams made of high-strength concrete, shows good concordance with the test results and greater uniformity of the results than the starting equations. Relatively small dissipation of the results which the suggested equations give, enables defining sufficiently reliable design model while introducing the requested level of security.

7 LITERATURA

- [1] Ahmad S.H., Khaloo A.R., Poveda A.: Shear Capacity of Reinforced High-Strength Concrete Beams, ACI Journal, Proc. 83, (2) 1986, pages 297-305
- [2] Bae Y.H., Lee J.H., Yoon Y.S.: Prediction of Shear Strength in High-Strength Concrete Beams Considering Size Effect, Magazine of Concrete Research, May 2006, pages 193-200
- [3] Cladera B. A.: Shear Design of Reinforced High-Strength Concrete Beams, Doctoral thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, December 2002, pages 168
- [4] Elzanty A.H., Nilson A.H., Slate F.O.: Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams Using High-Strength Concrete, ACI Journal 83, (2), 1986, 290-296

REZIME

PRORAČUN SMIČUĆE NOSIVOSTI GREDA OD BETONA VISOKE ČVRSTOĆE

Radmila SINDIĆ-GREBOVIĆ

U radu su, na bazi postojećih jednačina za proračun nosivosti na smicanje i rezultata eksperimentalnih ispitivanja na gredama od betona visoke čvrstoće, definisani novi izrazi za proračun nosivosti na smicanje armiranobetonskih greda od betona visoke čvrstoće. Inovirane jednačine su definisane sa ciljem postizanja bolje saglasnosti računskih vrijednosti sa rezultatima testova, za grede od betona visoke čvrstoće.

Jednačine su izvedene sa pretpostavkom da se vrijednost granične sile smicanja može predstaviti u obliku zbira doprinosa betonskog dijela presjeka i doprinosa smičuće armature.

Doprinos betonskog dijela presjeka sa podužnom armaturom definisan je koristeći jednačinu izvedenu iz veze između smičuće sile u gredi i promjene momenta savijanja duž grede zajedno sa eksperimentalno određenim doprinosom lučnog dejstva. U jednačine su uključeni najvažniji parametri nosivosti na smicanje: čvrstoća betona f_{ck} , koeficijent armiranja podužnom armaturom ρ , relativni raspon smicanja a/d i redukcionni faktor veličine u funkciji visine presjeka d .

Doprinos smičuće armature, osim nosivosti armature $\rho_v f_{yv}$, obuhvata parametar d/a i indeks grednog dejstva I_n .

Predviđeno je da se definisane relacije koriste za grede koje imaju najmanje minimalnu smičuću armaturu.

Pri definisanju inoviranih jednačina korišćena je nelinearna regresiona analiza primjenom programa Curve Expert.

Inovirane jednačine su testirane primjenom većeg broja eksperimentalnih rezultata, koji se odnose na ispitivanja smičuće nosivosti greda od betona visoke čvrstoće.

Ključne riječi: beton visoke čvrstoće, nosivost na smicanje, proračunske jednačine, regresiona analiza

7 REFERENCES

- [5] Hawkins N.M., Kuchma D.A., Mast R.F., Marsh L.M., Reineck K.H.: Simplified Shear Design of Structural Concrete Members, NCHRP Report 549 Washington 2005, pages 54
- [6] Kim D., Kim W., White R.N.: Arch Action in Reinforced Concrete Beams - A Rational Prediction of Shear Strength, ACI Structural Journal, 96 (4), 1999, pages 586-593
- [7] Russo G., Somma G., Angeli P.: Design Shear Strength Formula for High Strength Concrete Beams, Materials and Structures, RILEM, 37, Decem. 2004, pages 680-688
- [8] Sindić-Grebović R.: Uticaj visoke čvrstoće betona na smičuću nosivost armiranobetonskih greda, Doktorska disertacija, Univerzitet Crne Gore, Podgorica, 2009. str. 263
- [9] Sindić-Grebović R. i Ulićević, M.: Eksperimentalna analiza svježeg betona visokih čvrstoća, Materijali i konstrukcija br. 3-4, 1997. str. 2-13.

SUMMARY

PREDICTION OF SHEAR STRENGTH IN HIGH-STRENGTH CONCRETE BEAMS

Radmila SINDIĆ-GREBOVIĆ

New equations for prediction of shear strength of high-strength concrete beams, based on the present shear strength equations and results of experimental researches on the high-strength concrete beams, are defined in this paper. The new shear strength equations are defined in order to attain better agreement between design values and test results for high-strength concrete beams.

Equations were derived with hypothesis that the values of ultimate forces of shear strength may be presented as sum of concrete part of the beam contribution and shear reinforcement contribution.

Contribution of the concrete part of the beam with longitudinal reinforcement is derived from the relationship between shear force and the rate of change of bending moment along a beam, coupled with experimental findings for the arch action. The most important parameters of shear strength: concrete strength f_{ck} , longitudinal reinforcement ratio ρ , shear span to depth ratio a/d and size effect reduction factor, depending on effective beam depth d , were included in the relations.

The shear reinforcement contribution, apart from strength of reinforcement $\rho_v f_{yv}$, comprises parameter d/a and beam action index I_n .

The use of the defined relations is restricted only to beams that contain minimal predicted shear reinforcement.

Non-linear regression analysis, performed using computer program Curve Expert, was used during the defining of innovative equations.

Innovative equations were tested using large number of experimental results related to the research of high-strength concrete beams.

Key words: high-strength concrete, shear strength, design equation, regression analysis

EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA ODRĐENIH TERMO-FIZIČKIH I MEHANIČKIH SVOJSTAVA EPS BETONA

EXPERIMENTAL TESTING OF CERTAIN THERMO-PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF EPS CONCRETE

Dragica JEVTIĆ
Dimitrije ZAKIĆ

STRUČNI RAD
UDK: 666.973 = 861

1 UVOD

EPS beton je lakoagregatni kompozit spravljen na bazi granula ekspaniranog polistirena (stiropora) i klasičnih komponentnih materijala za beton: cementa i vode, sa odgovarajućim specifičnim hemijskim dodacima. U poslednjih pedeset do šezdeset godina u svetu je razvijeno i koristi se više različitih varijanti ovakvih lakoagregatnih betona, pod različitim komercijalnim nazivima [1]. Jedan od predstavnika predmetnih kompozita je i Simprolit, koji je patentiran i uspešno se koristi u Srbiji i Ruskoj Federaciji [4]. Svojstva ovog materijala su ispitivana, u više navrata, u Laboratoriji za materijale Građevinskog fakulteta u Beogradu. Ovom prilikom biće prikazani rezultati sopstvenih eksperimentalnih ispitivanja Simprolita, kao reprezentata grupe termoizolacionih materijala tipa EPS betona. Konkretno, radi se o specifičnim ispitivanjima iz oblasti građevinske fizike - sistema odvođenja vodene pare sa ravnih krovova, zatim kapilarnog upijanja i otpornosti EPS kompozita u uslovima niskih temperatura.

Kao što je poznato, da bi bili kompetitivni na tržištu, savremeni termoizolacioni materijali moraju da ispune mnoge oštre zahteve, kao što su:

- niska zapreminska masa, odnosno velika poroznost;
- zadovoljavajuća mehanička svojstva;
- malo upijanje vode;
- dobra termoizolaciona svojstva;
- zadovoljavajuća propustljivost za vazduh i gasove;

Prof. dr Dragica Jevtić, dipl.inž.tehn.
Asis. mr Dimitrije Zakić, dipl.inž.građ.
Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet
Bul. kralja Aleksandra 73, Beograd, Srbija

1 INTRODUCTION

EPS concrete is a lightweight composite material made of expanded polystyrene (styrofoam) grains and classic concrete component materials: cement and water, with addition of special chemical admixtures. In the last fifty to sixty years many different varieties of this type of lightweight concrete have been developed and applied, under different commercial names [1]. One of the representatives of such composite materials is Simprolit, which has been patented and successfully applied both in Serbia and in Russian Federation [4]. The properties of this material have been tested, in several occasions, in the Laboratory for materials at the Faculty of Civil Engineering in Belgrade. In this paper, the results of own experimental research of Simprolit - being a representative of EPS concrete as a thermoinsulation material, will be presented. In particular, specific tests regarding Civil engineering physics will be discussed - steam conduction system for flat roofs, capillary absorption and frost resistance of EPS composite materials.

In order to be competitive at the market, contemporary thermo-insulating materials must fulfill lots of strict demands including:

- Low density, i.e. high porosity;
- Satisfactory mechanical properties;
- Low water absorption;
- Good thermo-insulating properties;
- Satisfactory steam and gas permeability;

Dragica Jevtić, PhD
Dimitrije Zakić, Assist. prof., MSc, Assist.
Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade
Bul. kralja Aleksandra 73, Belgrade, Serbia

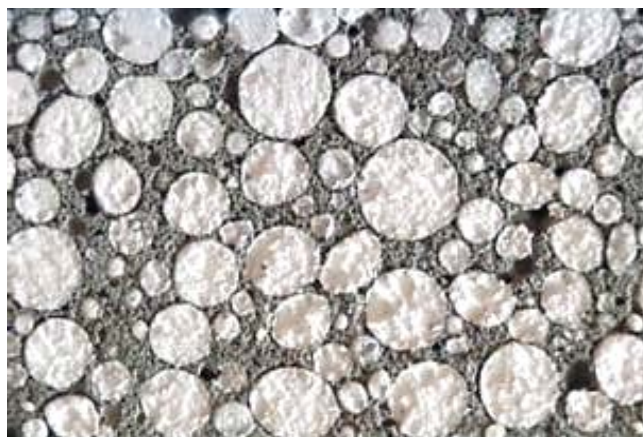
- otpornost na dejstvo mraza;
- hemijska i biološka otpornost;
- vatrootpornost;
- netoksičnost;

prihvatljiva cena [2].

Prvi uslov, koji se odnosi na veliku poroznost termoizolacionih materijala zasniva se na postojanju pora u obliku veoma sitnih vazдушnih mehurića ili veoma tankih slojeva vazduha. Krupnije vazdušne šupljine nisu dozvoljene, jer bi se na taj način povećala toplotna provodljivost usled efekata konvekcije i radijacije. Karakter (tip) pora, kao i njihova uniformna raspodela, takođe su veoma značajni. Osnovna zamisao je u tome da se naprave materijali sa veoma malim, zatvorenim porama ("ćelijama"). U takvim porama vazduh se ne kreće, što doprinosi boljim termoizolacionim efektima. Takođe, pore ovog tipa ne "komuniciraju" između sebe što, kao rezultat ima niže vrednosti upijanja vode i bolju otpornost na dejstvo mraza.

- Frost resistance;
- Chemical and biological resistance;
- Fireproofing;
- Non-toxic;
- Acceptable price [2].

The first condition concerning high porosity of thermo-insulating materials is based on the existence of pores in the shape of tiny air cells or very thin air layers. Larger air voids are not allowed because of the heat conductivity increase due to the convection and radiation effects. The character (type) of the pores as well as their uniform distribution is also very important. The idea is to make materials with very small closed - airtight pores ("cells"). In these pores the air doesn't move, which leads to better thermo-insulation effects. Also, pores of this type are not "communicating" with each other giving, as a result, lower water absorption and higher frost resistance.



Slika 1. Struktura Simprolita
Figure 1. The structure of Simprolita

Zadovoljavajuća mehanička svojstva (pre svega čvrstoće pri pritisku i pri savijanju) takođe su značajne za očuvanje integriteta materijala tokom transporta, ugradnje i eksploatacije.

Simprolita karakteriše relativno niska vrednost zapreminske mase ($150-300 \text{ kg/m}^3$) i veoma nizak koeficijent toplotne provodljivosti ($0,055-0,085 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$), koji praktično ne zavisi od vlažnosti materijala. Veličina paropropustljivosti kreće se između $0,110-0,135 \text{ mg/m}\cdot\text{h}\cdot\text{Pa}$, što zidovima napravljenim od Simprolita omogućava da normalno "dišu". Predmetni materijal poseduje takođe i dobra zvukoizolaciona svojstva. Tako na primer, moguće je sniziti nivo buke i do 40 dB – u zavisnosti od debljine primenjenog kompozita [3].

Visoka otpornost na dejstvo mraza takođe karakteriše Simprolita: nakon 50 ciklusa smrzavanje-odmrzavanje (između $+15\text{°C}$ i -20°C), pad čvrstoće iznosio je svega 1,5% - 1,8% [5].

Većina napred navedenih svojstava Simprolita ispitana je u okviru Instituta za materijale i konstrukcije na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Između ostalog, program ispitivanja obuhvatio je i određivanje veličine kapilarnog upijanja vode. Prilikom tih ispitivanja, srednja vrednost visine kapilarnog penjanja

Satisfactory values of mechanical properties (compressive and flexural strength) are also significant for keeping the integrity of the material during transport, construction and exploitation.

Simprolita is characterized by relatively low density ($150-300 \text{ kg/m}^3$) and very low heat conductivity coefficient ($0,055-0,085 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$), which practically does not depend on the moisture content. Steam permeability ranges between $0,110-0,135 \text{ mg/m}\cdot\text{h}\cdot\text{Pa}$, which gives the opportunity to the walls made of Simprolita to "breathe" normally. This material also possesses good soundproofing properties. For example, it is possible to reduce noise level up to 40 dB depending on the composite thickness [3].

High frost resistance also characterizes Simprolita: at 50-cycle freeze-thaw test (from $+15\text{°C}$ to -20°C), loss of strength varies only from 1,5% - 1,8% [5].

Most of the above-mentioned properties of Simprolita were tested at the Institute for materials and structures - Faculty of Civil engineering in Belgrade. Among other laboratory tests, the investigation program also consisted of capillary water absorption determination. The mean value of the height of absorbed water was less than 4 cm for all samples, which was very good in

vode iznosila je manje od 4 cm, što predstavlja veoma dobar rezultat s obzirom na ukupnu visinu uzoraka od 20 cm. Naredna fotografija (slika 2) prikazuje uzorke Simprolita nakon pomenutog testiranja [8].

comparison with the complete sample height of 20 cm. The next picture (Fig. 2) shows the samples after testing [8].



Slika 2. Visina upijanja vode nakon testa kapilarnog penjanja
Figure 2. The height of absorbed water after capillary absorption test

Simprolit se koristi za proizvodnju različitih elemenata od lakog betona, kao što su: termoizolacioni fasadni paneli, blokovi za spoljašnje zidove, blokovi za pregradne zidove, prefabrikovani pregradni zidni paneli, međuspratne ploče, krovne ploče, sistemi za odvođenje vodene pare, itd. Neki od pomenutih elemenata i sistema ispitivani su na Građevinskom fakultetu u Beogradu - u okviru Instituta za materijale i konstrukcije. Između ostalog, obavljena su laboratorijska ispitivanja u cilju određivanja ponašanja pod opterećenjem pojedinih elemenata, kao i celokupnog Simprolit sistema za termoizolaciju i odvođenje vodene pare koji se primenjuje na ravnim krovovima. Takođe, izvršeni su i testovi na osnovu kojih sa može izvesti zaključak o otpornosti na dejstvo mraza Simprolit blokova ispunjenih svežim betonom. Rezultati predmetnih eksperimentalnih istraživanja prikazani su u okviru ovog rada [7, 9].

2 SISTEM ZA TERMOIZOLACIJU I ODVOĐENJE VODENE PARE KOD RAVNIH KROVOVA

Jedan od osnovnih zadataka koje treba rešiti tokom izvođenja ravnih krovova predstavlja odvođenje vodene pare iz višeslojnih termoizolacionih i hidroizolacionih sistema. Ovi sistemi se obično sastoje od sledećih elemenata: (1) krovna ploča (od betona ili čeličnog lima), (2) parna brana sa ili bez sistema za odvođenje pare, (3) termoizolacija, (4) sloj za izravnanje, (5) podloga za hidroizolaciju, (6) hidroizolacija, (7) sloj za zaštitu hidroizolacije (kod prohodnih krovova).

Osnovni problem kod ovakvih sistema vezan je za redosled slojeva, a naročito za poziciju sloja za izravna-

Simprolit is used for production of various light-concrete elements, such as: thermo-insulation facade panels, blocks for outer walls, blocks for partition walls and facade casing, pre-fabricated partition wall panels, insulation panels, slabs, roof plates, steam conduction systems, etc. Several of these products were tested at the Faculty of Civil Engineering - Institute for materials and structures in Belgrade, Serbia. Among other experiments, laboratory tests were conducted in order to determine the behavior under load of different elements, as well as the behavior of the whole Simprolit thermo-insulation and steam conduction system for flat roofs. Also, some tests were made in order to examine the frost resistance of Simprolit blocks filled with fresh concrete. The results of these experimental investigations are presented in this paper [7, 9].

2 THERMO-INSULATION AND STEAM CONDUCTION SYSTEM FOR FLAT ROOFS

One of the main tasks to be solved during flat roofs' construction is the conduction of steam from the multi-layered thermo-insulation and hydro-isolation systems. These systems usually consist of the following elements: (1) roof plate (concrete or corrugated tin sheet), (2) steam-isolation with or without the steam conduction system, (3) thermo-insulation, (4) leveling layer, (5) base layer for hydro-isolation, (6) hydro-isolation, (7) hydro-isolation protection layer (for transient roofs).

The general problem concerning such systems is related to the arrangement of layers, especially to the position of the leveling layer. An experienced designer

nje. Iskusan projektant će taj sloj uvek postaviti ispod hidroizolacije, ili čak ispod termoizolacije, tako da se u slučaju oštećenja ili propuštanja hidroizolacije voda može odvesti sa najniže tačke krova. U suprotnom, ukoliko voda prođe kroz hidroizolaciju, to će svakako dovesti do oštećenja izolacije, pa čak i do degradacije celokupne krovne konstrukcije, naročito nakon većeg broja ciklusa smrzavanje-odmrzavanje.

Takođe, prisutan je i klimatski faktor (tačnije vlažnost vazduha i padavine) na koje se ne može uticati niti ih možemo predvideti tokom faze projektovanja. Naime, parna brana, izvedena sa ili bez sistema za odvođenje vodene pare, a koja je postavljena direktno iznad krovne ploče služi kao zaštita od pare koja dolazi odozdo. S druge strane, hidroizolacija koja predstavlja završni sloj na ravnom krovu, štiti krovnu konstrukciju od atmosferske vode ali takođe služi i kao parna brana štiteći termoizolacione slojeve od pare koja bi mogla doći odozgo.

Međutim, problem vlage zarobljene između parne brane i hidroizolacije (unutar termoizolacionog sloja) na ovaj način ostaje nerešen. Ta vlaga se obično javlja kao posledica padavina nastalih tokom izvođenja ravnog krova. Šanse da će do takve situacije stvarno doći rastu sa povećanjem površine i produženjem perioda izgradnje krova [6, 8].

Mere koje izvođač obično preduzima u cilju izbegavanja pomenutih problema najčešće ne daju zadovoljavajuće rezultate. To se dešava zato što uobičajena tehnologija građenja u ovakvim slučajevima zahteva deljenje površine krova na manje sekcije, čije se izvođenje može završiti u okviru jednog radnog dana tokom koga se izvode svi projektovani slojevi, počev od parne brane, preko sloja za izravnjanje, termoizolacije i konačno hidroizolacije, uključujući i obaveznu bočnu hidroizolaciju za zaštitu svake od pojedinačnih sekcija.

Ovakvu proceduru, međutim, poštuje retko koji izvođač, iz razloga čestih prekida radova i teškoća prilikom izvođenja sloja za izravnjanje. Takođe, primena predmetne procedure sobom povlači i povećanje cene ravnog krova, praktično do nivoa koji nijedan investitor ne želi da plati, naročito imajući u vidu da se ovakvi poslovi obično plaćaju po m² izvedenog krova.

S druge strane, čak i ukoliko se slojevi ravnog krova izvedu uz primenu korektnog tehnološkog postupka, problem slobodne vlage unutar sloja za izravnjanje termoizolacije ostaje i dalje prisutan. Iako je ovu vlagu moguće eliminisati primenom specijalnih tehnoloških metoda, to takođe podrazumeva dodatno produženje rokova izgradnje, kao i višu cenu konstrukcije ravnog krova.

Teoretski posmatrano, moguće rešenje ovog problema bilo bi postavljanje paropropusne hidroizolacije, koja bi propuštala paru koja dolazi odozdo, istovremeno sprečavajući prodor vode koja dolazi odozgo. Iako je kvalitetna paropropusna hidroizolacija relativno retka, a pri tome obično dosta skupa i zahteva ugradnju dodatnog zaštitnog sloja (zbog svoje slabe otpornosti na mehaničke uticaje i direktno dejstvo sunčevih zraka), ovakav tip rešenja je sigurniji sa aspekta funkcionalnosti i trajnosti [9].

Drugo, znatno češće primenjivano rešenje istog problema, predstavlja ugradnja parnih konduktora duž cele površine krova. U tom slučaju, međutim, može se javiti problem vezan za proračun potrebnog tačnog rastojanja između pojedinačnih konduktora. Naime,

will always place the leveling layer under the hydro-isolation, even under the thermo-insulation, so that the water could be drained from the lowest point in case of hydro-isolation damage or leaking. Otherwise, if the water gets through the hydro-isolation it will certainly lead to deterioration of the isolation and even to the degradation of the whole roof structure, especially after numerous freeze-thaw cycles.

Also, there is the climate factor (more precisely air humidity and precipitation) that can not be influenced or predicted during the design stage of the project. Namely, the vapor barrier, designed with or without the steam conduction system and placed directly over the roof plate, serves as protection from the steam coming from beneath. On the other hand, the hydro-isolation as the final layer on the flat roofs, protects the roof structure from the atmospheric water, but also serves as the vapor barrier over the thermo-insulation layers stopping the steam coming from above.

However, the problem of the moisture trapped between the vapor barrier and the hydro-isolation (inside the thermo-insulation layer) remains unsolved. This moisture usually appears as a result of the rainfall during the construction of the flat roof. The chance that such situation will occur rises with the increment of the roof's surface and the prolongation of the construction works [6, 8].

The measures taken by the contractor in order to avoid such problems usually don't give satisfactory results. This happens because of the fact that such construction technology requires division of the roof's surface into smaller sections, which can be finished within one working day making all the necessary layers, from the steam-isolation, leveling layer, thermo-insulation and finally hydro-isolation, including the obligatory lateral hydro-isolation protection of each section.

However, this is the procedure that almost none of the contractors follow, because of the frequent work interruptions and the difficulties in the construction of the leveling layer. It also drastically increases the price of the flat roof structure, to the extent that almost no investor is willing to pay, especially because of the fact that this type of work is usually paid per m² of the finished flat roof.

On the other hand, even when the layers of the flat roof are made using the correct technology, the problem of the free moisture from the leveling layer still remains unsolved. Although it is possible to eliminate such moisture using special technological methods, it also means the prolongation of the construction deadlines and higher total price of the flat roof structure.

Theoretically, one of the possible solutions for this problem could be the fitting of a steam permeable hydro isolation, which lets through the steam coming from beneath, but doesn't let through the water coming from above. Although the quality steam permeable hydro isolation is relatively rare, usually expensive and requires the additional protection layer (because of its poor resistance to mechanical influence and direct sun rays), this type of solution is safer regarding the aspects of functionality and durability [9].

Another and more often applied solution is the installation of steam conductors along the whole surface of the roof. However, a practical problem may arise during calculation of the exact distance between steam conductors. Namely, the following basic condition must

prilikom tog proračuna mora se poštovati sledeći uslov: otpor horizontalnom kretanju vodene pare kroz termoizolacioni sloj (na dužini izraženoj u metrima) mora biti manji nego otpor vertikalnom kretanju vodene pare kroz termoizolacioni sloj (na dužini izraženoj u centimetrima) povećanom vrednošću adhezije između sloja hidroizolacije i podloge, pri čemu su svi ovi faktori u relaciji sa temperaturom vazduha, stepenom izloženosti površine krova sunčevim zracima, atmosferskim pritiskom, vlažnošću vazduha, itd. Oštećenja koja se najčešće javljaju kod ovakvih sistema mogu da nastanu kao posledica jednog od sledeća dva problema:

- Ili su parni konduktori postavljeni predaleko jedan od drugog, tako da se para širi i odvaja hidroizolacioni sloj od podloge, pre nego što bude sprovedena kroz konduktore,

- Ili su parni konduktori postavljeni isuviše blizu jedan drugom, formirajući «sito» na površini krova, što kao logičnu posledicu ima oštećenja i procurivanje hidroizolacije, naročito u blizini samih konduktora; ovo se dešava ili zbog uticaja većeg broja ciklusa smrzavanje-zagrevanje, ili zbog otklizavanja slojeva snega sa krova, uticaja vetra, mehaničkih oštećenja, itd.

Kombinacijom svih povoljnih rešenja ovog problema i eliminisanjem svih napred navedenih negativnih aspekata, Simprolit sistem za ventilisane ravne krovove učinio je mogućim potpuno uklanjanje vodene pare iz izolacionog sloja, istovremeno povećavajući njegovu trajnost, kao i trajnost ostalih slojeva ravnog krova.

Ovaj sistem je veoma efikasan, naročito u slučajevima kada ostali sistemi dosegnu svoje granice ili postanu potpuno neprimenjivi u konkretnom slučaju, kao na primer kod izvođenja ravnih krovova kod električnih centrala, toplana, zatvorenih bazena i ostalih objekata u kojima vladaju povišene temperature (preko 50°C) visok stepen vlažnosti (čak i preko 90%), u prostoru neposredno ispod krovne konstrukcije.

2.1 Laboratorijska ispitivanja

Simprolit sistem za termoizolaciju i odvođenje vodene pare se generalno sastoji od sledećih elemenata: "SPBS60" blokovi (dimenzije: 60x12x19cm), "SOP3" jednoslojne Simprolit termoizolacione ploče (debljine 3cm), Simprolit monolit, ploče i ulošci od stiropora, PVC folije i cevi (parni konduktori). Međutim, prilikom laboratorijskih ispitivanja tretirani su samo noseći elementi sistema. Imajući ovo u vidu, sledeći tipovi uzoraka su odabrani kao reprezentativni:

- "SPBS60" blok (dimenzija: 60x12x19cm) bez uložaka stiropora;

- "SPBS60" blok (dimenzija: 60x12x19cm) sa ulošcima stiropora umetnutim u šupljine u središtu bloka;

- "SOP3" jednoslojna Simprolit termoizolaciona ploča (debljine 3cm);

- kompletan Simprolit sistem sa tri horizontalna sloja, koja se sastoje od dva "SPBS60" bloka sa ulošcima stiropora i jedne "SOP3" ploče.

Srednja vrednost zapreminske mase ispitivanih Simprolit blokova iznosila je 195 kg/m³. Na slici 3 prikazani su Simprolit blok "SPBS60" i jednoslojna termoizolaciona Simprolit ploča "SOP3".

be obeyed: the resistance to the horizontal motion of the steam through the thermo-insulation layer (at the length measured in meters) must be smaller than the resistance to the vertical motion of the steam through the thermo-insulation layer (at the length measured in centimeters) increased by the adhesion value between the hydro isolation and the base layer, all these factors being in relation to the air temperature, exposure of the roof's surface to the sun, atmospheric pressure, air humidity, etc. The most frequent damages of this type of protection system occur because of one of the next two problems:

- either the steam conductors are placed to far away one from another, so that the steam expands and detaches the hydro isolation layer before it is evacuated through the conductors,

- or the steam conductors are placed to close, making a «sieve» from the roof surface, which results as a logical consequence in damaging and leaking of the hydro isolation, especially in the area near the conductors; this happens either because of the freeze-thaw cycles' influence on the hydro isolation, or because of the snow sliding down the roof, wind effect, mechanical damages, etc.

Combining all the good solutions of this problem, and eliminating the above mentioned negative aspects, Simprolit system for ventilated flat roofs makes it possible to completely remove steam from the hydro isolation layer, improving at the same time its durability as well as the durability of other layers.

It is very effective, especially in cases when other systems reach their limits or become totally inapplicable, for instance - construction of flat roofs in power plants, heating plants, indoor swimming pools and all other places with high temperature (over 50°C) and high air humidity (even over 90%) in the area directly under the roof structure.

2.1 Laboratory Testing

Simprolit system for thermo-insulation and steam conduction generally consists of the following elements: "SPBS60" blocks (dimensions: 60x12x19cm), "SOP3" single-layer Simprolit thermo-insulation plates (3cm thick), Simprolit monolith, Styrofoam plates and pads, PVC sheets and pipes (steam conductors). However, only the bearing elements of the system were considered during the laboratory testing. Having this in mind, the following representative types of testing specimens were chosen:

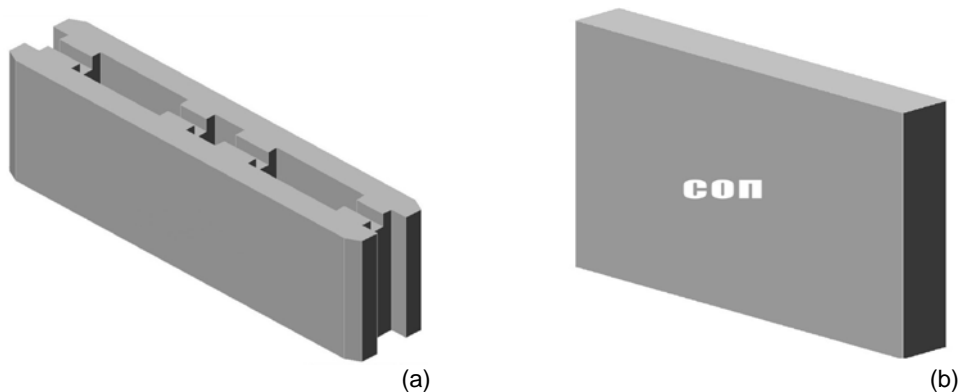
- "SPBS60" block (dimensions: 60x12x19cm) without styrofoam pads;

- "SPBS60" block (dimensions: 60x12x19cm) with styrofoam pads inserted into the cavities in the middle of the block;

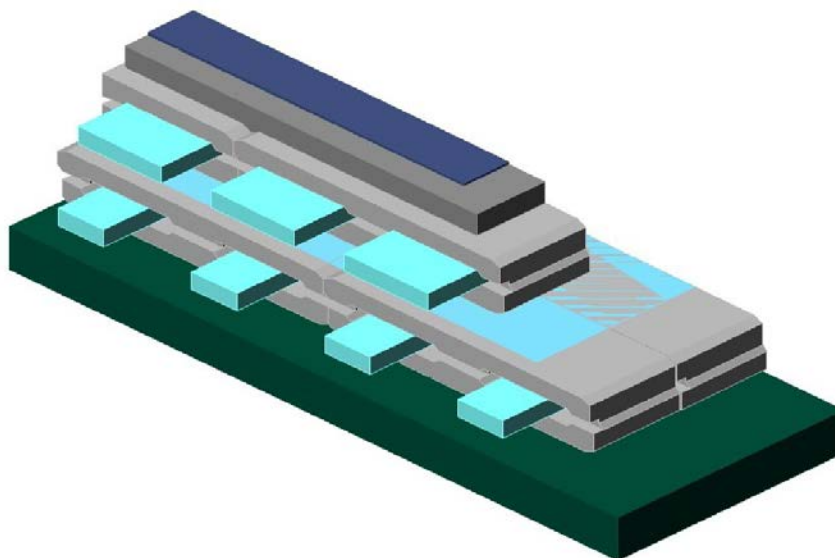
- "SOP3" single-layer Simprolit thermo-insulation plate (3cm thick);

- the whole Simprolit system with three horizontal layers, consisting of two "SPBS60" blocks with styrofoam pads and one "SOP3" plate.

The average density of tested Simprolit blocks was 195 kg/m³. Figure 3 shows both "SPBS60" Simprolit block and Simprolit "SOP3" single-layer thermo-insulation plate.



Slika 3. Simprolit blok "SPBS60" (a) i jednoslojna termoizolaciona ploča "SOP3" (b)
 Figure 3. Simprolit block "SPBS60" (a) and single-layer thermo-insulation plate "SOP3" (b)



Slika 4. SIMPROLIT sistem za termoizolaciju i odvođenje vodene pare
 Figure 4. SIMPROLIT SYSTEM for thermo-insulation and steam conduction

Ulošci koji su korišćeni za ispunjavanje šupljina unutar blokova bili su isečeni iz ploča stiropora (zapreminska masa $\gamma \cong 30 \text{ kg/m}^3$). Na slici 4 vidi se da je sistem formiran tako da su šupljine u donjem redu blokova ispunjene samo delimično stiroporom, u cilju obezbeđenja uspešnog odvođenja vodene pare iz sistema. S druge strane, šupljine u okviru blokova koji se nalaze u gornjem redu ispunjene su u potpunosti ulošcima stiropora [11].

2.2 Postupak ispitivanja i eksperimentalni rezultati

Ispitivanje svih napred navedenih karakterističnih tipova uzoraka - koji predstavljaju elemente Simprolit sistema za termoizolaciju i odvođenje vodene pare sa ravnih krovova, vršeno je prema dispoziciji prikazanoj na narednoj fotografiji - tj. na slici 5. Očigledno, uzorci su ispitivani na pritisak pri čemu je merena veličina sile (P), ali istovremeno i deformacije - odnosno vertikalna

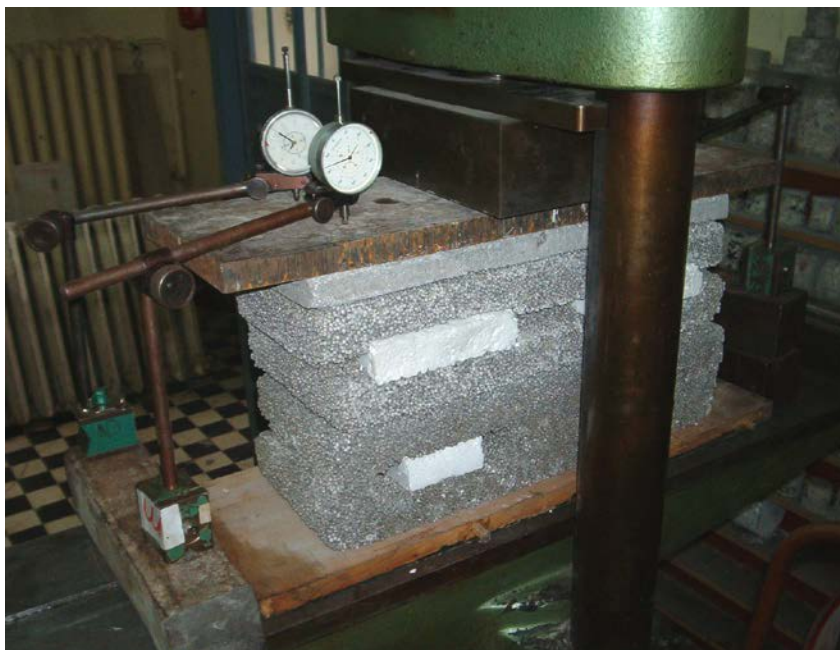
The pads used for filling of blocks' cavities were cut out of styrofoam plates (density of styrofoam $\gamma \cong 30 \text{ kg/m}^3$). Figure 4 shows that the system is formed in such manner that the cavities of the lower row of blocks are filled only partially with styrofoam, in order to provide successful conduction of the steam out of the system. On the other hand, the cavities of the upper row of blocks are completely filled with styrofoam pads [11].

2.2 The Testing Procedure and the Experimental Results

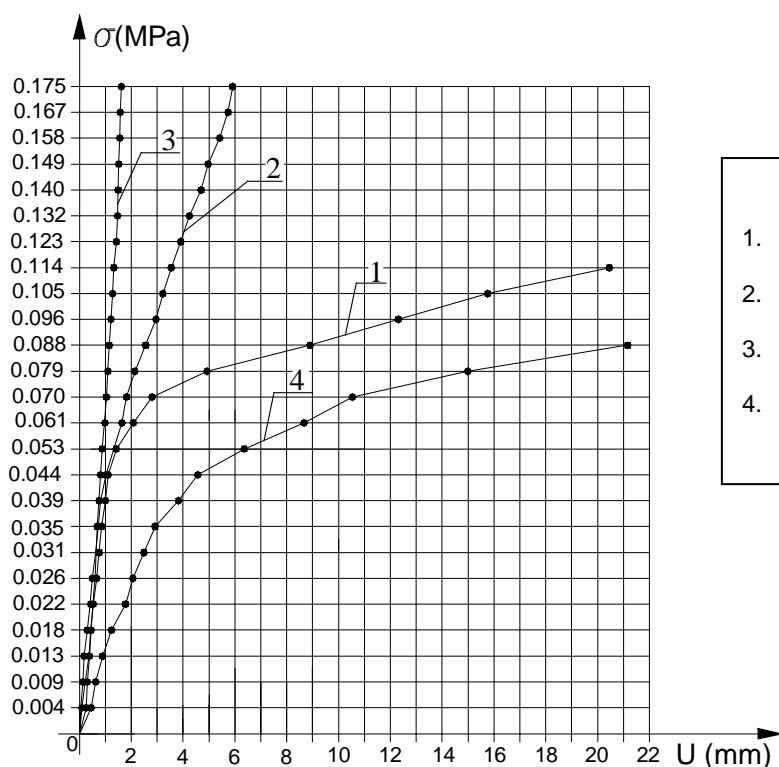
The testing of all the above mentioned characteristic types of specimens - representing the elements of Simprolit thermo-insulation and steam conduction system for flat roofs, was conducted according to the disposition shown at the following photo - Figure 5. Obviously, the specimens were tested under pressure measuring the force value (P), but at the same time the

pomeranja ugaonih tačaka, pomoću četiri ugibomera: U1, U2, U3 i U4. Istovremeno sa registrovanjem veličine sile P (u daN) i vertikalnih deformacija U (u mm), računate su i odgovarajuće vrednosti napona σ (u MPa).

deflections - i.e. vertical movements of the corner points were also measured, using four deflectometers: U1, U2, U3 and U4. Together with force values P (in daN) and vertical deflections U (in mm), the corresponding stress values σ (in MPa) were calculated.



Slika 5. Dispozicija ispitivanja Simprolit sistema
Figure 5. Testing disposition of the system



- LEGENDA:
1. SPBS60 blok bez uložaka stiropora
SPBS60 block without styrofoam pads
 2. SPBS60 blok sa ulošcima stiropora
SPBS60 block with styrofoam pads
 3. Simprolit SOP3 termoizolaciona ploča
Simprolit SOP3 thermo-insulation plate
 4. SIMPROLIT sistem
SIMPROLIT system

Slika 6. Komparativni dijagram Napon - Vertikalni ugibi za sva 4 tipa uzoraka
Figure 6. Comparative diagram Stress vs. Vertical deflection for all 4 specimen types

Na istom dijagramu (slika 6), predstavljena je σ -U zavisnost za sva četiri reprezentativna tipa ispitivanih uzoraka [10].

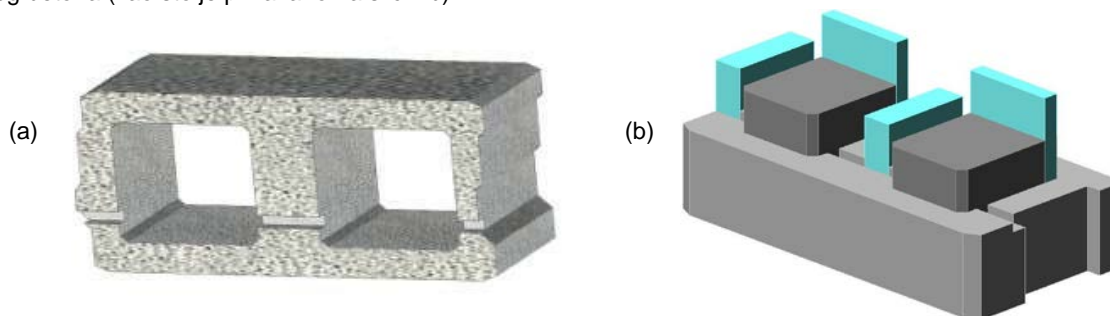
3 OTPORNOST NA DEJSTVO MRAZA SIMPROLIT BLOKOVA

Kao što je već naglašeno, Simprolit je materijal koji karakteriše visoka otpornost na dejstvo mraza. Tako na primer, nakon izlaganja smrzavanju-odmrzavanju tokom 50 ciklusa, pri čemu je temperatura varirana od $+15^{\circ}\text{C}$ do -20°C , zabeleženi pad čvrstoće iznosio je svega 1,5% - 1,8%. Prilikom jednog drugod ispitivanja, izvršenog u okviru Naučno-istraživačkog Instituta Ruske Akademije za Građevinarstvo, Simprolit blokovi su bili testirani takođe na 50 ciklusa smrzavanja-odmrzavanja pri temperaturama $+70^{\circ}\text{C}$ i -30°C , nakon čega nije zabeležen gubitak integriteta niti termoizolacionih svojstava.

Sledeći korak u istraživanju ponašanja Simprolit blokova izloženih ekstremnim klimatskim uslovima načinjen je u Laboratoriji za materijale pri Institutu za materijale i konstrukcije Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Imajući na umu činjenicu da Simprolit blokovi namenjeni za izvođenje spoljašnjih fasadnih zidova poseduju otvore (šupljine), koji se tokom građenja zidova ispunjavaju svežim betonom, odlučeno je da se ispita sposobnost ovih blokova da efikasno zaštite beton od smrzavanja tokom početnog perioda njegovog očvršćavanja.

Generalno, Simprolit blokovi za spoljašnje zidove proizvode se u debljinama od 20cm, 25cm i 30cm i sa 2 ili 4 podužne šupljine, koje mogu da imaju dno ili da budu potpuno otvorene. Za konkretno ispitivanje, odabran je Simprolit blok "SBD 25" – koji je prikazan na slici 7a. Njegove spoljne dimenzije iznose $50 \times 25 \times 19\text{cm}$ i, kao što se sa slike može videti, ima 2 podužne šupljine (dimenzija svake šupljine: $14 \times 17 \times 19\text{cm}$) koje su potpuno otvorene.

Pre ispunjavanja šupljina svežim betonom, u svaku od šupljina postavljeni su ulošci stiropora debljine 3 cm, čija je namena bila da služe kao dodatna termoizolacija svežeg betona (kao što je prikazano na slici 7b).



Slika 7. Simprolit blok "SBD 25" bez (a) i sa ugrađenim betonom i ulošcima stiropora (b)
Figure 7. Simprolit block "SBD 25" without (a) and with fresh concrete and Styrofoam pads (b)

Svež beton je spravljen sa 320 kg/m^3 portland cementa (oznake CEM II, klase 42.5R), sa rečnim agregatom (maksimalno zrno $31,5\text{mm}$) i toplom vodom (zagrejanom na 55°C). Temperatura sveže mešavine

At the same diagram (Fig. 6), the σ -U relations for all of the four representative types of testing specimens are shown [10].

3 FROST RESISTANCE OF SIMPROLIT BLOCKS

As it was already pointed out, Simprolit is a material which is characterized by high frost resistance. For instance, when subjected to 50-times repeated cycle of heating-freezing, from $+15^{\circ}\text{C}$ to -20°C , its loss of strength was only 1,5% - 1,8%. At another test, performed in the Scientific-research Institute of the Russian Academy of Civil Engineering, Simprolit blocks were tested at 50 freeze-thaw cycles under temperatures ranging between $+70^{\circ}\text{C}$ and -30°C , and there was no loss of integrity or thermo-insulation properties.

The next step in the research of behavior of Simprolit blocks under extreme climate conditions was taken in the Laboratory of the Institute for materials and structures at the Faculty of Civil Engineering in Belgrade, Serbia. Having in mind the fact that Simprolit blocks for outer façade walls have hollow spaces (cavities) which are filled up with fresh concrete during construction of the walls, the researchers decided to test the ability of Simprolit blocks to act as efficient protection for concrete against freezing during early stages of its hardening period.

Generally, Simprolit blocks for outer facade walls are produced in 20cm, 25cm and 30cm thickness and with 2 or 4 longitudinal cavities, which may be completely hollow or with the bottom. For this investigation, Simprolit block type "SBD 25" was chosen – which is presented at the next Figure 7a. Its outer dimensions are $50 \times 25 \times 19\text{cm}$ and, as it can be seen, it has 2 longitudinal cavities ($14 \times 17 \times 19\text{cm}$ each) which are completely hollow.

Before filling of the cavities with fresh concrete, 3 cm thick Styrofoam pads were inserted into each one of the cavities, acting as additional insulation (as shown at Figure 7b).

Fresh concrete was made using 320 kg/m^3 of Portland cement (CEM II, class 42.5R), river aggregate (with maximum grain size $31,5\text{mm}$) and warm water (pre-heated at 55°C). The temperature of the mix before

neposredno pre ugrađivanja u Simprolit blokove iznosila je 30°C. Ukupno je napravljeno 18 uzoraka: od toga je 9 uzoraka negovano pod normalnim laboratorijskim uslovima (temperatura vazduha 20±2°C i vlažnost 60%), dok je preostalih 9 uzoraka stavljeno u klima-komoru gde je bilo izloženo specijalnom režimu nege. Ovaj režim usvojen je kao simulacija oštrih zimskih uslova i sastojao se od dva periodično ponavljana ciklusa: tokom prvih 12 časova temperatura u klima-komori iznosila je -26°C, a tokom drugih 12 časova ova temperatura iznosila je -12°C. Uzorci su bili stavljeni u komoru neposredno nakon ugrađivanja svežeg betona u šupljine Simprolit blokova. U cilju sprečavanja smrzavanja svežeg betona (do čega bi bez sumnje došlo veoma brzo na temperaturi od -26°C), pre ubacivanja blokova u klima-komoru sa gornje i donje strane svakog bloka postavljene su table stiropora debljine 5 cm.

Takođe, napravljene su i betonske kocke dimenzija 15x15x15cm u cilju određivanja čvrstoće pri pritisku (klase) ugrađenog betona. Predmetne kocke negovane su u vodi temperature 20±2°C. Svi uzorci (blokovi negovani na vazduhu u normalnim laboratorijskim uslovima, blokovi izloženi cikličkom smrzavanju i betonske kocke negovane u vodi) ispitivani su pri starostima od 7, 14 i 28 dana. Kao mera otpornosti na dejstvo mraza i termoizolacione sposobnosti Simprolit blokova usvojena je razlika između čvrstoća pri pritisku ostvarenih pri različitim režimima nege. Rezultati predmetnog eksperimentalnog istraživanja prikazani su u tabeli 1. Dati rezultati predstavljaju srednje vrednosti dobijene na bazi ispitivanja 3 uzorka.

filling the Simprolit blocks' cavities was 30°C. Altogether 18 specimens were made: 9 of them were cured at normal laboratory conditions (air temperature 20±2°C and humidity 60%) and the other 9 were put into the thermo-regulation chamber and subjected to a special curing regime. This regime was adopted as a simulation of hard winter conditions and it consisted of two cycles: during the first 12-hour cycle the temperature inside the chamber was -26°C, and during the second 12-hour cycle the temperature was -12°C. The specimens were put into the chamber just several minutes after the fresh concrete was poured into the blocks' cavities. In order to avoid freezing of the fresh concrete (which would undoubtedly occur very quickly at -26°C), 5cm thick Styrofoam plates were put both on the upper and the lower side of each block before they were placed into the chamber.

Also, 15x15x15cm concrete cubes were made in order to determine the compressive strength (class) of concrete. These cubes were cured in water at the temperature of 20±2°C. All specimens (blocks cured at normal air conditions, blocks subjected to freezing cycles and concrete cubes cured in warm water) were tested at the age of 7, 14 and 28 days. The difference between compressive strength values obtained during different curing conditions was adopted as a measure of the frost resistance and thermo-insulation ability of Simprolit blocks. The results of this experiment are presented in the table 1. All results that are given below represent average values based on testing of 3 specimens.

Tabela 1 Čvrstoća pri pritisku uzoraka (u MPa)
Table 1 Compressive strength of specimens (in MPa)

Starost	7 dana	14 dana	28 dana
Tip uzorka			
"SBD 25" Blok ¹⁾	18,8	21,3	27,2
"SBD 25" Blok ²⁾	9,9	18,6	24,8
Betonske kocke (a=15cm)	37,6	42,8	48,6

Napomene: 1) Blokovi ispunjeni svežim betonom i negovani na vazduhu temperature 20±2°C i vlažnosti 60%.

2) Blokovi ispunjeni svežim betonom i negovani u komori na temperaturi između -26 i -12°C

Remarks: 1) Blocks filled with fresh concrete and cured at air temperature 20±2°C and humidity 60%.

2) Blocks filled with fresh concrete and cured at temperatures between -26 and -12°C.



(a) Punjenje blokova svežim betonom
Filling with fresh concrete



(b) Negovanje u termo-komori
Curing in the thermo-chamber



(c) Ispitivanje čvrstoće pri pritisku
Compressive strength testing

Slika 8. Testiranje otpornosti na dejstvo mraza Simprolit blokova (a, b i c)

Figure 8. Testing of frost resistance of Simprolit blocks (a, b and c)

Prema rezultatima ispitivanja betonskih kocki, ostvarena je klasa betona C35/45 (u skladu sa EN206 standardom). Fotografije snimljene tokom predmetnih ispitivanja date su na slici 8.

4 ZAKLJUČCI

Uzimajući u obzir sve napred navedene rezultate eksperimentalnih istraživanja, može da se izvede generalni zaključak po kome Simprolit sistem za termoizolaciju i odvođenje vodene pare sa ravnih krovova ima zadovoljavajuću nosivost, a njegove deformacije koje odgovaraju eksploatacionim opterećenjima ne premašuju dozvoljene granice za ovaj tip elemenata konstrukcije. Takođe, može se uočiti da postoji dobra korelacija između rezultata ostvarenih prilikom ispitivanja pojedinačnih elemenata i rezultata za Simprolit sistem kao celinu.

Prema prikazanim eksperimentalnim rezultatima, može se izvući još jedan zaključak: da pri uobičajenim nivoima opterećenja (ispod 500 kg/m^2 , odnosno $0,005 \text{ MPa}$) vertikalne deformacije Simprolit sistema za ravne krovove iznose svega nekoliko desetih delova milimetra, dok za maksimalne vrednosti opterećenja u eksploataciji ($3500\text{-}4000 \text{ kg/m}^2$, odnosno $0,035\text{-}0,040 \text{ MPa}$), te deformacije ne prelaze 3 mm .

Imajući u vidu sve napred navedeno, očigledno je da Simprolit sistem za termoizolaciju i odvođenje vodene pare zadovoljava neophodne uslove za primenu prilikom izvođenja ravnih krovova – kako sa aspekta nosivosti, tako i sa aspekta građevinske fizike.

Što se tiče ispitivanja otpornosti na dejstvo mraza, dobijeni rezultati pokazuju da Simprolit blokovi opremljeni dodatnim ulošcima stiropora predstavljaju veoma efikasno rešenje u smislu termički izolovane oplata. Iako su uzorci bili izloženi izuzetno niskim temperaturama (između -26 i -12°C) nije došlo do smrzavanja svežeg betona. Šta više, ukoliko uporedimo rezultate ispitivanja čvrstoće pri pritisku Simprolit blokova koji su negovani u normalnim uslovima sa rezultatima blokova negovanih na niskim temperaturama, možemo da zaključimo da je ostvarena razlika niža od one koju bismo mogli da očekujemo (s obzirom na oštar režim negovanja uzoraka). Naime, nakon 7 dana ta razlika iznosila je 47% , nakon 14 dana bila je 13% , a nakon 28 dana svega 9% .

Na bazi napred prezentovanih činjenica, ali takođe imajući u vidu i druge relevantne eksperimentalne rezultate, može se izvući generalni zaključak po kome Simprolit - kao predstavnik EPS lakoagregatnih betona na bazi portland cementa, granula ekspaniranog polistirena i specijalnih aditiva, zadovoljava visoke zahteve koji se postavljaju pred savremene termoizolacione paropropusne materijale. Ovaj kompozit karakteriše relativno niska zapreminska masa, visoke termoizolacione performanse, kao i visok stepen otpornosti na dejstvo mraza [12].

According to the results of cube testing, the applied class of concrete was C35/45 (according to EN206 standard). The photos taken during these tests are given at Figure 8.

4 CONCLUSIONS

Taking all the above presented experimental results into account, the general conclusion can be drawn that the tested Simprolit thermo-insulation and steam conduction system for flat roofs has satisfactory bearing ability, as well as that the deflections corresponding to the exploitation compressive load do not exceed the limits allowed for this type of construction elements. It can be noticed that there is also a good correlation between the results obtained during testing of individual elements and the results for Simprolit system as a whole.

According to the presented experimental results, another conclusion can be made: that the vertical deflections of Simprolit thermo-insulation and steam conduction system for flat roofs for usual load values (under 500 kg/m^2 , i.e. $0,005 \text{ MPa}$) amount to just a few tenths of a millimeter, and for maximum possible load values during exploitation ($3500\text{-}4000 \text{ kg/m}^2$, i.e. $0,035\text{-}0,040 \text{ MPa}$) these deflections do not exceed 3 mm .

Having in mind all the above stated facts, it is obvious that Simprolit thermo-insulation and steam conduction system for flat roofs satisfies the necessary requirements for application in flat-roof construction from the aspect of Civil Engineering Physics.

As the testing of the frost resistance is concerned, the obtained results show that Simprolit blocks equipped with additional styrofoam pads represent very efficient type of thermally insulated formwork. Although subjected to extremely hard environmental conditions (temperatures between -26 and -12°C) fresh concrete did not freeze. Even more, if we compare the compressive strength testing results of Simprolit blocks that were cured in normal conditions with the results of those cured at low temperatures, we can conclude that the difference was smaller than expected. Namely, after 7 days this difference amounted to 47% , after 14 days it amounted to 13% and after 28 days it was just 9% .

Based on the above-mentioned facts, but also having in mind other relevant experimental research data, a general conclusion can be made that Simprolit - light concrete made of Portland cement, expanded polystyrene granules and special additives - as a representative of EPS satisfies high demands necessary for contemporary thermo-insulation and steam conduction materials. This composite material is characterized by relatively low density and high performance thermo-insulation properties, as well as high frost resistance [12].

5 LITERATURA

- [1] Muravljev M., Jevtić D.: Građevinski materijali 2, Građevinski fakultet u Beogradu, Beograd, 1999.
- [2] Muravljev M, Jevtić D, Zakić D., Dević M. : Testing of different types of "Simplolit" plates - an example, 10th International Symposium of MASE, Ohrid, Macedonia, September 25-27. 2003., pp. 393-400.
- [3] Dević M., Jevtić D., Zakić D.: Simplolit Building Elements - a Complex Approach to Keep the Buildings Warm, Conference "Contemporary Civil Engineering Practice 2003", FTN and DGiTNS, Proceedings - pp. 199-215, Novi Sad, 27.-28. March 2003.
- [4] Bikbay M.Y.: Lecture presented at the Second International Conference on Roof Structures and Insulation of Civil Engineering Objects and Communications, Moscow, 2002.
- [5] Zakić D., Jevtić D, Živković S., Dević M.: Testing of "Simplolit" Thermo-insulation and Steam Conduction System for Flat Roofs, 11th International Symposium of MASE, Ohrid, Macedonia, September 25-27. 2005., pp. 393-400.
- [6] Jevtić D, Zakić D., Dević M., Markičević J.: Application of Polystyrene-Based Concrete as a High-Performance Thermo-Insulation Composite, 5th International Conference RADMI 2005, Vrnjačka Banja, Serbia, pp. 710-715.
- [7] SIMPRO katalogi proizvodnje i primene.

REZIME

EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA ODREĐENIH TERMO-FIZIČKIH I MEHANIČKIH SVOJSTAVA EPS BETONA

*Dragica JEVTIĆ
Dimitrije ZAKIĆ*

U ovom radu prikazani su rezultati sopstvenih eksperimentalnih ispitivanja nekih od važnijih svojstava lakoagregatnih kompozita tipa EPS betona - sa stanovišta građevinske fizike. Akcenat je stavljen na aktuelne probleme termoizolacije, odvođenja vodene pare, kapilarnog upijanja i ponašanja materijala u uslovima niskih temperatura spoljašnje sredine. Nakon obavljenih brojnih laboratorijskih testova, autori su došli do zaključka da Simplolit - kao reprezent grupe EPS betona spravljenih na bazi portland cementa, granula ekspaniranog polistirena i specijalnih aditiva - zadovoljava visoke zahteve koji se postavljaju pred savremene termoizolacione i paropropusne materijale. Ovaj kompozit karakterišu relativno niska zapreminska masa i dobre termoizolacione performanse, kao i visoka otpornost na dejstvo mraza. Simplolit sistem za termoizolaciju odvođenje vodene pare sa ravnih krovova ispunjava neophodne uslove - kako sa aspekta nosivosti, tako i sa aspekta građevinske fizike.

Ključne reči: EPS beton, termo-fizička svojstva, mehanička svojstva, odvođenje vodene pare, otpornost na dejstvo mraza, kapilarno upijanje, nosivost.

5 REFERENCES

- [8] Zakić, D., Jevtić, D., Dević, M.: Simplolit-sistema - Éffektivnoe rešenje dlja ob'ektov, podvergajušihsja vozdejsstvu nuzkih temperatur v processe stroitel'stva i éksploatacii, NII Stroitel'noj fiziki Raasn - 50 let, Stroitel'naja fizika v XXI veke, Materialy naučno-tehničkoj konferencii, Moskva, 2006, ISBN 5-902630-03-07.
- [9] Jevtić D., Zakić D.: Application of Simplolit Systems In Order to Improve Thermo-Physical Performance of Contemporary Buildings, RADMI 2006, Budva, septembar 2006., Zbornik radova, CD, ISBN 86-83803-21-X (HTMS)
- [10] Jevtić D., Zakić, D., Savić, A.: Testing of Different Types of "Simplolit" Plates - Lightweight Concrete Elements, 1st International Congress of Serbian Society of Mechanics, 10-13th April, 2007, pp. 393-399 Kopaonik, ISBN 978-86-909973-0-5.
- [11] Muravljev, M., Jevtić D., Zakić, D., Dević, M.: Simplolit sistem za utopljanje fasada i zaštitu građevinskih objekata od požara, IV savetovanje SGITS-a "Ocena stanja, održavanje i sanacija građevinskih objekata i naselja", Zlatibor, 25-28. aprila 2005, str. 433-440., Zbornik radova.
- [12] Živković S., Jevtić D., Radonjanin V.: Istraživanje na području materijala i njihove primene, Materijali i konstrukcije 48 (2005) 4, (str. 9-24), generalni izveštaji i prikaz radova, YU ISSN 0543-0798.

SUMMARY

EXPERIMENTAL TESTING OF CERTAIN THERMO-PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF EPS CONCRETE

*Dragica JEVTIĆ
Dimitrije ZAKIĆ*

In this paper the experimental results obtained during testing of certain important properties of EPS concrete as a type of lightweight composite material - regarding Civil engineering physics are presented. Most of the attention has been paid to actual problems of thermo-insulation, steam conduction, capillary absorption and behavior of the material when exposed to low temperatures. After numerous laboratory tests, the authors concluded that Simplolit - as a represent of the EPS group of light concrete composites made of Portland cement, expanded polystyrene granules and special additives - satisfies high demands necessary for contemporary thermo-insulation and steam conduction materials. This composite material is characterized by relatively low density and good thermo-insulation properties, as well as high frost resistance. Simplolit system for thermo-insulation and steam conduction fulfils all the required conditions – both from the aspects of bearing capacity and Civil engineering physics.

Key words: EPS concrete, thermo-physical properties, mechanical properties, steam conduction, frost resistance, capillary absorption, bearing capacity.

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 prihvaćće 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 detaljnijih 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 sopstvene 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 raspravljeni, 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 sopšten 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 sopštenja 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 ovog broja, 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 tehnici, 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 tehnici, na kvalitetnoj hartiji sa ostrim 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 tabela 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 obrnuti 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.

* Od ovog broja uputstvo autorima je modifikovano i treba ga, u pripremi radova, slediti.

