

Univerzitet Crne Gore
GRAĐEVINSKI FAKULTET
81000 Podgorica
Džordža Vašingtona b.b.



Tel: 020 245 014, 244 905
Fax: 020 241 903
Website: www.ucg.ac.me/gf
E-mail: gf@ucg.ac.me
Žiro račun: 510-278-79
530-13649-97

Podgorica, 25.05.2020.

Broj: 653

UNIVERZITET CRNE GORE
Senatu
PODGORICA

U prilogu vam dostavljamo predlog Vijeća Građevinskog fakulteta Univerziteta Crne Gore o imenovanju Komisije za ocjenu doktorske disertacije mr Nataše Kopitović Vuković, dipl.inž.grad.

S poštovanjem,



SEKRETAR FAKULTETA,
Miro Božović, dipl.prav.

ISPUNJENOST USLOVA DOKTORANDA

OPŠTI PODACI O DOKTORANDU			
Titula, ime, ime roditelja, prezime	mr Nataša Vladimira Kopitović Vuković		
Fakultet	Građevinski fakultet		
Studijski program	Građevinarstvo		
Broj indeksa	103/08		
NAZIV DOKTORSKE DISERTACIJE			
Na službenom jeziku	Ponašanje AB konstrukcija ojačanih kompozitnim materijalima pod dugotrajnim opterećenjem		
Na engleskom jeziku	Behaviour of RC structures strengthened with composite materials under the long-term load		
Naučna oblast	Građevinarstvo - Konstrukcije		
MENTOR/MENTORI			
Mentor	Prof.dr Radomir Zejak, dipl.inž.građ, redovni profesor	Univerzitet Crne Gore, Građevinski fakultet, Crna Gora	Građevinarstvo – građevinski materijali i konstrukcije
KOMISIJA ZA PREGLED I OCJENU DOKTORSKE DISERTACIJE			
Prof.dr Radenko Pejović, dipl.inž.građ, redovni profesor	Univerzitet Crne Gore, Građevinski fakultet, Crna Gora	Građevinarstvo – građ. materijali i konstrukcije	
Prof.dr Vlastimir Radonjanin, dipl.inž.građ, redovni profesor	Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Srbija	Građevinarstvo – građ. materijali, procjena stanja i sanacija konstr.	
Prof.dr Radomir Zejak, dipl.inž.građ, redovni profesor	Univerzitet Crne Gore, Građevinski fakultet, Crna Gora	Građevinarstvo – građ. materijali i konstrukcije	
Datumi značajni za ocjenu doktorske disertacije			
Sjednica Senata na kojoj je data saglasnost na ocjenu teme i kandidata	28.05.2015. god.		
Dostavljanje doktorske disertacije organizacionoj jedinici i saglasnost mentora	14.05.2020. god.		
Sjednica Vijeća organizacione jedinice na kojoj je dat prijedlog za imenovanje komisije za pregled i ocjenu doktorske disertacije	19.05.2020. god.		
ISPUNJENOST USLOVA DOKTORANDA			
U skladu sa članom 38 pravila doktorskih studija kandidat je dio sopstvenih istraživanja vezanih za doktorsku disertaciju publikovao u časopisu sa SCI/SCIE liste kao prvi autor.			

Spisak radova doktoranda iz oblasti doktorskih studija koje je publikovao u časopisima sa SCI/SCIE liste

Rad objavljen u časopisu indeksiranom u SCI/SCIE listi

1. Vuković N.K., Jevrić M. & Zejak R.: *Experimental analysis of RC elements strengthened with CFRP strips*, Mechanics of Composite Materials, Vol. 56, No. 1, March 2020, 75-84. ISSN/eISSN: 0191-5665/1573-8922. DOI 10.1007/s11029-020-09861-x <http://link.springer.com/article/10.1007/s11029-020-09861-x>

Radovi objavljeni na međunarodnim / regionalnim konferencijama koji sadrže dijelove disertacije

2. N. Đuranović, N. Kopitović-Vuković: *Pregled trenutnog stanja primjene kompozitne armature u sanaciji konstrukcija*, VII naučno-stručno savetovanje: Ocena stanja, održavanje i sanacija građevinskih objekata i naselja, Savez građevinskih inženjera Srbije, Zlatibor, 2011, 425-430. ISBN: 978-86-904089-9-3.
3. Kopitović-Vuković N.: *Inovativna upotreba FRP materijala u betonskim konstrukcijama*, The 4th International conference "Civil engineering-science and practice", GNP 2012, Žabljak, 2012, 1193-1199. ISBN 978-86-82707-21-9.
4. N. Kopitović-Vuković: *Ispitivanja vremenskih deformacija na betonskim gredama armiranih kompozitnom armaturom*, The 5th International conference "Civil engineering-science and practice", GNP 2014, Žabljak, 2014, 955-962. ISBN 978-86-82707-23-3.
5. Zejak R., Kopitović-Vuković N.: *Eksperimentalna analiza ponašanja AB greda ojačanih kompozitnim materijalima*, 11th International scientific technical conference – Contemporary theory and practice in building development, Banja Luka, 2015, 401-408. ISBN 978-99976-642-0-4.
6. N. Kopitović-Vuković, R. Zejak, M. Jevrić, N. Baša: *Rheological model of FRP reinforced concrete*, The 7th International conference "Civil engineering-science and practice", GNP 2020, Kolašin, 2020, 557-564. ISBN 978-86-82707-32-5.

Obrazloženje mentora o korišćenju doktorske disertacije u publikovanim radovima

Mr Nataša Kopitović Vuković je, kao prvi autor, dio rezultata sopstvenih istraživanja vezanih za doktorsku disertaciju objavila u radu koji je publikovan u časopisu indeksiranom na SCI/SCIE listi, kao i u pet radova predstavljenih na međunarodnim naučno-stručnim skupovima. U nastavku je dat osvrt na rad objavljen u časopisu *Mechanics of Composite Materials*, sa dijelom rezultata sopstvenih eksperimentalnih istraživanja.

Naslov objavljenog rada je: *Experimental analysis of RC elements strengthened with CFRP strips*.

Koautori rada su dr Marija Jevrić i prof. dr Radomir Zejak.

Rad prikazuje rezultate eksperimentalnog ispitivanja prostih greda T presjeka, stvarnih dimenzija, ojačanih na savijanje karbonskim trakama različitih dužina i ispitanih na dejstvo dva tipa kratkotrajnog opterećenja – koncentrisanog i ravnomjernog.

U okviru poglavlja 1 data su uvodna razmatranja, uz osvrt na dosadašnja ispitivanja u svijetu iz

predmetne oblasti. Ovaj dio rada predstavlja sažetak uvodnog dijela poglavlja 1 doktorske disertacije. Drugo poglavlje obuhvata razmatranja u kojima je predstavljen predmet, cilj i značaj sprovedenog istraživanja, koja su prikazana u poglavlju 1.1. disertacije.

U radu je u poglavlju 3 predstavljen plan eksperimentalnog istraživanja, počevši od prikaza kompletnog programa ispitivanja sa svim relevantnim karakteristikama opreme i materijala, upotrijebljenih za izradu i ojačavanje eksperimentalnih modela. Ovi podaci preuzeti su iz poglavlja 4 doktorske disertacije.

Centralni dio rada, prikazan u poglavlju 4, posvećen je predstavljanju i analizi rezultata ispitivanja ojačanih eksperimentalnih modela pri dejstvu kratkotrajnog opterećenja. Opisani su mehanizmi loma i proces deformacije i destrukcije ispitivanih modela, sa prikazom fenomena koji su se manifestovali u toku ispitivanja. Istovremeno je analiziran odgovor sistema u odnosu na pojedine uticajne parametre koji su varirani u ovom eksperimentu. Rezultati predstavljeni u ovom dijelu rada preuzeti su iz poglavlja 5 doktorske disertacije.

Zaključci izvedeni u radu su dio zaključaka navedenih u disertaciji u potpoglavlju 5.6, i oni glase:

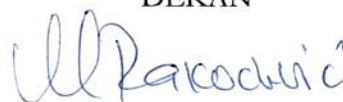
- Spoljašnje ojačanje karbonskim trakama armirano betonskih greda značajno povećava njihovu nosivost na savijanje, pri čemu redukuje veličine ugiba i širine prslina.
- Nakon završenog sopstvenog eksperimentalnog ispitivanja na modelima u prirodnoj veličini i sprovedene analize rezultata, a naročito uticaja dužine ojačanja na tip loma, došlo se do zaključka da nije potrebno koristiti poprečna ukrućenja, kao ni povećavati dužinu trake, jer nema naznaka da će doći do njenog potpunog odvajanja, kao što se dešavalo u ranijim eksperimentalnim istraživanjima.
- Takođe je zaključeno da je, u slučaju spoljašnjeg ojačavanja greda, dovoljno koristiti CFRP trake čija je dužina jednaka polovini grede, jer nema značajnih povećanja nosivosti pri ojačavanju dužim trakama. Ovo se odnosi na slučaj ispitivanja na savijanje prostih greda, kada se ne očekuje porast opterećenja koje bi povećalo granični momenat savijanja za više od 60%.

Datum i ovjera (pečat i potpis odgovorne osobe)

U Podgorici, 19.05.2020.god.



DEKAN

**Prilog dokumenta sadrži:**

1. Potvrdu o predaji doktorske disertacije organizacionoj jedinici
2. Odluku o imenovanju komisije za pregled i ocjenu doktorske disertacije
3. Kopiju rada publikovanog u časopisu sa odgovarajuće liste
4. Biografiju i bibliografiju kandidata
5. Biografiju i bibliografiju članova komisije za pregled i ocjenu doktorske disertacije sa potvrdom o izboru u odgovarajuće akademsko zvanje i potvrdom da barem jedan član komisije nije u radnom odnosu na Univerzitetu Crne Gore

Na osnovu člana 64. Statuta Univerziteta Crne Gore i člana 41. Pravila doktorskih studija Univerziteta Crne Gore, Vijeće Građevinskog fakulteta u Podgorici na sjednici održanoj 19.05.2020.godine, utvrdilo je

PREDLOG

Predlaže se Senatu Univerziteta Crne Gore da imenuje Komisiju za ocjenu doktorske disertacije mr Nataše Kopitović - Vuković, dipl.inž.građ., pod naslovom „Ponašanje AB konstrukcija ojačanih kompozitnim materijalima pod dugotrajnim opterećenjem“, u sastavu:

1. Prof. dr Radenko Pejović, dipl.inž.građ., redovni profesor Građevinskog fakulteta Univerziteta Crne Gore, u penziji.
2. Prof. dr Radomir Zejak, dipl.inž.građ., redovni profesor Građevinskog fakulteta Univerziteta Crne Gore.
3. Prof. dr Vlastimir Radonjanin, dipl.inž.građ., redovni profesor Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu.

Komisija je dužna da Vijeću Građevinskog fakulteta u Podgorici, podnese izvještaj koji sadrži ocjenu doktorske disertacije, u roku od 45 dana od dana imenovanja.

- VIJEĆE GRAĐEVINSKOG FAKULTETA U PODGORICI -



DEKAN,
Marina Rakočević
Prof. dr Marina Rakočević

VIJEĆU GRAĐEVINSKOG FAKULTETA UNIVERZITETA CRNE GORE

Predmet: *ZAHTJEV ZA OCJENU DOKTORSKE DISERTACIJE*

kandidata mr nataše Kopitović Vuković

Poštovani,

Molim Vas da imenujete komisiju za ocjenu doktorske disertacije pod nazivom:

„Ponašanje AB konstrukcija ojačanih kompozitnim materijalima pod dugotrajnim opterećenjem“.

Uz molbu prilažem sledeću dokumentaciju:

- Pismenu saglasnost mentora da rad zadovoljava kriterijume doktorske disertacije;
- Primjerak doktorske disertacije u štampanoj formi;
- CD sa cjelokupnim sadržajem doktorske disertacije u PDF/A formatu;
- Fotokopiju svojih objavljenih radova tematski vezanih za doktorsku disertaciju;
- Rad objavljen u časopisu na SCI listi, u štampanoj formi;
- Potpisanu izjavu, datu kao prilog 1 Uputstvu za oblikovanje doktorske disertacije
- Biografiju

u Podgorici,

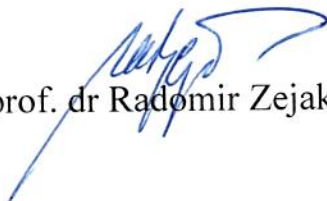
14.05.2020.god.

Doktorand:


mr Nataša Kopitović Vuković

УНИВЕРЗИТЕТ ЦРНЕ ГОРЕ			
ГРАЂЕВИНСКИ ФАКУЛТЕТ - ПОДГОРИЦА			
Примљено: 14. 05. 2020.			
Орг. јед.	Број	Прилог	Број. јединица
	580		

Saglasan mentor:


prof. dr Radomir Zejak

UNIVERZITET CRNE GORE
GRAĐEVINSKI FAKULTET
PODGORICA

Na osnovu člana 37. Pravila doktorskih studija Univerziteta Crne Gore dajem
sljedeću

SAGLASNOST

Rad pod nazivom:

**„Ponašanje AB konstrukcija ojačanih kompozitnim materijalima pod
dugotrajnim opterećenjem“,**

autora mr Nataša Kopitović Vuković, dipl.inž.građ., stručnog saradnika
Građevinskog fakulteta Univerziteta Crne Gore, zadovoljava kriterijume doktorske
disertacije, propisane Statutom Univerziteta Crne Gore i Pravilima doktorskih
studija.

u Podgorici,

14.05.2020.god.

Mentor:

prof. dr Radomir Zejak

УНИВЕРЗИТЕТ ЦРНЕ ГОРЕ			
ГРАЂЕВИНСКИ ФАКУЛТЕТ - ПОДГОРИЦА			
Примљено: 14. 05. 2020.			
Орг. јед	Број	Прилог	Вриједност
	580/1		

Izjava o autorstvu

Potpisana Nataša Kopitović Vuković

Broj indeksa/upisa 103/08

Izjavljujem

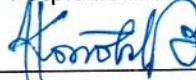
da je doktorska disertacija pod naslovom

Ponašanje AB konstrukcija ojačanih kompozitnim materijalima pod dugotrajnim opterećenjem

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predložena disertacija ni u cjelini ni u djelovima nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih ustanova visokog obrazovanja,
- da su rezultati korektno navedeni, i
- da nijesam povrijedila autorska i druga prava intelektualne svojine koja pripadaju trećim licima.

U Podgorici, 14. 05. 2020. godine

Potpis doktoranda



УНИВЕРЗИТЕТ ЦРНЕ ГОРЕ			
ГРАЂЕВИНСКИ ФАКУЛТЕТ - ПОДГОРИЦА			
Примљено: 14. 05. 2020.			
Орг. јед	Број	Прилог	Вриједност
	580/3		

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF RC ELEMENTS STRENGTHENED WITH CFRP STRIPS

N. K. Vuković,* M. Jevrić, and R. Zejak

Keywords: composite T-beams, full-size beams, CFRP strips, flexural behavior, experiment, short-term load

This work is the result of experimental research conducted to determine the contribution of a composite material to improving the mechanical behavior of old, full-size reinforced T-beams in operation conditions under the action of short-term loads. The tension side of their ribs were strengthened by carbon strips of different lengths. Then, they were tested in loading by concentrated and uniformly distributed short-term loads. It was concluded that, for strengthening simply supported beams, there was no need for using CFRP strips longer than half of their length, and a lateral anchorage was not required. This refers to bending tests where no load increment exceeding 60% of the flexural strength is expected. The results obtained from this experiment may be of use in modern engineering practices, especially because tests conducted on old, full-size samples are very rare.

1. Introduction

The external CFRP strengthening of the tension side of concrete beams has proven to be a successful alternative to the much more expensive replacement of these structures. The high tensile strength and elasticity modulus of CFRP make this material attractive and practical for strengthening existing structural elements [1, 2]. The effective use of this technique has been demonstrated in a large number of experiments [3, 4]. Various experimental and theoretical studies have shown that this type of strengthening significantly increases the ultimate load-carrying capacity of elements, while reducing their deflections and width of cracks [5-7]. It also affects the behavior of these structural elements under a load and changes their fracture mechanism [8].

The authors of previous studies have come to the conclusion that the application of CFRP strengthening to a RC beam increases its ultimate load-carrying capacity by 10 to 160% [9], while strengthened full-size beams have by at least a 99%

University of Montenegro, Faculty of Civil Engineering, Cetinjski put bb, 81000 Podgorica, Montenegro

*Corresponding author; tel.: ++382 69 670 500; e-mail: nataly@ucg.ac.me

higher ultimate moment capacity than unstrengthened ones [10]. Similar conclusions come from the authors of [11], who investigated the strengthening of RC beams with CFRP lamellas. Previous studies have also revealed exceptional characteristics of the concrete-CFRP bond in the case of short-term loads [12].

The strengthening length is a parameter that plays a significant role not only in the strength of this bond, but also in the fracture mechanism of strengthened beams as a whole [13, 14]. The results obtained in [11, 15] indicate that an increase in the CFRP strengthening length, whether it is strengthened in shear or bending, increases the load-carrying capacity of beams. It was also found that the efficiency of the strengthening technique for beams retrofitted by CFRP in flexure varied depending on this parameter, because the main failure mode in the beams was the debonding of plates [16-19].

2. Scope and Objective of this Research

Many experimental studies have been carried out over the last few decades in searching the key characteristics of concrete beams strengthened with a CFRP material. Various combinations of different parameters influencing the mechanical behavior of samples were tried out, and such tests were found to be very demanding and expensive.

Therefore, it is not surprising that experimental data for strengthened full-size samples are not plentiful. Most papers on this topic are devoted to testing models, i.e., small-scale samples [20, 21]. Due to the modeling approaches, the results obtained regarding the performance of small samples cannot serve as representative ones [22]. It is also noted that strengthened have been mainly new beams with a rectangular cross section. That was the reason why T-section beams had been specially designed and produced for this purpose 10 years ago. They had been stored outside, loaded by their own weight, until examination.

The objective of our study was to evaluate the effectiveness of the CFRP strengthening system as applied to these beams. The impacts of different strengthening schemes and of two types of loads, concentrated and uniformly distributed short-term ones, were determined. This was done with the aim to increase the ultimate load-carrying capacities of tested samples, then to reduce their deflections, strains, crack widths, and also to change their fracture mechanism. Thus, this study was focused on

- the effect of the external strengthening position and
- the influence of a short-term load.

The aim of our research was to clear up, through experimental and theoretical studies, the mechanical behavior of old full-size structures, strengthened by CFRP strips of different length, under the action of short-term loads. In this paper, a detail analysis of the obtained experimental results is done. A comparative analysis with previous research studies was then carried out, in order to verify their conclusions.

3. Experimental Research Plan

The experimental study was carried out in the laboratory of the Faculty of Civil Engineering in Podgorica. An existing piece of equipment, with some necessary modifications, was employed. Six T-section samples were made as simply supported beams of length 7.5 m and high 43 cm using a concrete of class C25/30. The main reinforcement was a bar 22 mm in diameter as the tension steel and 12-mm ones in the compression zone. The stirrups were deformed bars 10 mm in diameter spaced 100 mm apart (Fig. 1).

Two of these aged beams were used as unstrengthened, control ones. The other four beams were externally strengthened by CFRP strips to resist the bending moment on the tension side of their cross section. As is known, such strips practically do not significantly increase the cross-sectional height of beams, but very efficiently increase their ultimate load-carrying capacity. Thus, the installation of an additional reinforcement can be avoided, which would require breaking into concrete and making a connection between the old and new reinforcement by anchoring the new one.

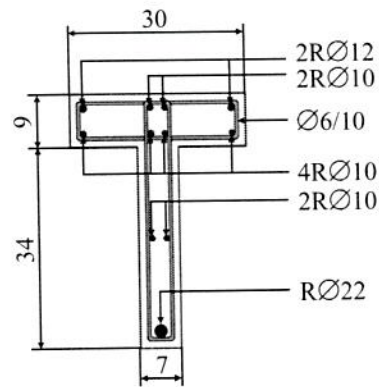


Fig. 1. Cross section of tested samples (dimensions in cm).

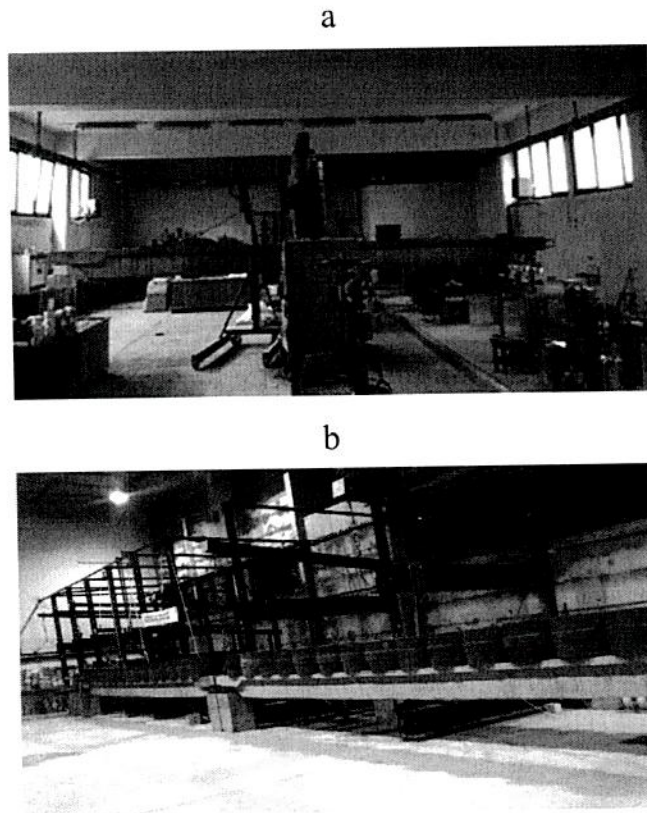


Fig. 2. Short-term bending tests of beams by concentrated (a) and uniformly distributed (b) loads.

3.1. Strengthening of samples

Surfaces of the beams were prepared as suggested by manufacturer's instructions for a proper bonding of CFRP strips to concrete. The beams were placed upside down, and an "S2" leveling mortar (a product of the "Sintek" company from Skopje, Macedonia) was applied to their previously cleaned and smoothed surfaces. This material is, in fact, a three-component epoxy mortar intended for the preparation and leveling of concrete substrates before strengthening with carbon strips. A coating of a

Primer “C” adhesive, also produced by the “Sintek” company was applied to this layer. It is a two-component material based on a polymer cement whose purpose is to ensure a proper adhesion between carbon strips and concrete. CFRP strips were then placed onto the prepared concrete surface. Their geometrical and mechanical parameters (manufacturer’s data) were as follows: length 4 and 6 m, width 50 mm, thickness 1.4 mm, tensile strength 3300MPa, elastic modulus 165 GPa, and fiber volume content 65-70%.

The strips were placed on the bottom of rib of the T-section beam in its midspan, with no anchorage system used. This was the zone with the highest concentration of stresses, where the largest cracks were observed during the short-term loading of the unstrengthened samples.

The strips were attached starting from one their end, and then a rubber roller was used to press out the any excess epoxy. In order to ensure proper adhesion, all samples were cured for at least three days. Ensuring a good bond between concrete and FRP strips is essential for a successful strengthening, especially if the building is in a aggressive coastal-tropical environment [23].

3.2. Instrumentation and test procedure

In the bending test, all of the beams were placed on concrete supports with a span of 7500 mm and instrumented for measuring of midspan deflections u and the deflections of quarter of the span. The load was applied monotonically in two ways: as a concentrated one by two hydraulic jacks attached to a pressure gage (Fig. 2a) and as a uniformly distributed one by 5-kN steel weights (Fig. 2b). The concentrated load was applied to the beams monotonically at a rate of about 5 kN/min from zero up to their failure. The predominantly uniform loading was carried out symmetrically from the middle of the beam toward its ends by 10-kN steps. Just before the fracture, an additional concentrated load was applied to the midspan of the beam. The testing was done in this way due to some limitations of the equipment and testing systems for these beams.

The strains in concrete were measured in two ways: by TML strain gages (Japan) and by “Pfender” mechanical strain meters having an accuracy of 1/1000 mm. The measurements were taken symmetrically from both sides of the beam, and the average results were adopted as relevant.

The strains in carbon strips were measured by BFLA-5-8 strain gages.

To measure deflections of the beams, linear variable displacement transducers (LVDT) were employed. A portable electronic data logger was used to record readings of the deflections.

Cracks were detected visually, and their maximum widths were measured in critical sections with an accuracy of 0.025 mm by a Zeiss microscopic magnifier. Their propagation was traced, and the corresponding loads were recorded.

4. Experimental Results

Table 1 shows the maximum values of characteristic parameters for the six beams tested. Individual results are given by diagrams. The dimensions of all the beams were the same, while the strengthening length and the loading method were varied. As a result, significant differences in the ultimate load-carrying capacities, deflections, strains, and types of fracture modes were found.

4.1. Flexural strength of beams

The ultimate load-carrying capacities of all tested beams and the corresponding bending moments are given in Table 1. As is seen, the ultimate bending moments of the strengthened beams were significantly higher than those of unstrengthened (control) beams: by 91-111% under the concentrated load and by 55-68% under the uniformly distributed one. But this differ-

TABLE 1: Characteristics of Tested Beams

Beam	Type of strengthening, m	Type of load	$P_{\max}$, kN / $q_{\max}$, kN/m	$M_{\max}$, kN·m	$\Delta M_{\max}$, %	$u_{\max}$, cm	$\alpha_{\max}$, deg	$\varepsilon_{\max}$	$\varepsilon_{\max}$	$\varepsilon_{\max}$	$a_{\max}$, mm	Type of fracture
									‰			
G1a	-	concentrated force	35.0	65.6	-	7.96	7.55	13.46	6.796	-	3.00	1
G2	4		67.0	125.5	91.3	6.80	7.30	6.53	7.59	6.59	0.75	
G3	6		74.0	138.7	111.4	7.70	3.80	8.17	7.96	7.45	0.55	
G1b	-	uniformly distributed	9.2	76.9	-	9.40	9.80	11.88	5.11	-	2.50	2
G4	4		13.5	119.4	55.3	9.00	7.67	6.29	1.17	6.15	0.90	
G5	6		14.1	128.8	67.5	11.10	4.20	7.88	1.41	7.20	0.80	

^a measured value for the cracked element

^b predominantly uniform load

^c increase is given in relation to the control beams G1a and G1b

¹ flexural rupture of concrete

² critical diagonal crack + flexural rupture of concrete

³ fracture of the concrete cover and partly along the strip

ence was very small between the strengthened beams themselves: 5-8% at the same length of strip (4 and 6 m, respectively) under the concentrated load and 8-11% under the uniformly distributed and concentrated loads, respectively, in the case of a longer strip.

4.2. Deflection

The control beam G1a, tested by a concentrated force showed a significant midspan deflection u of about 8 cm, at a relatively small ultimate bending moment. At the same bending moment, the deflections of beams G2 and G3 were only 2.1 and 1.1 cm, respectively. These beams had only slightly smaller deflections than the control beam G1a, which were caused by approximately double higher ultimate bending moments.

Beam G4 had almost the same deflection as beam G1b, but at a 55% higher ultimate bending moment. Beam G5 showed a deflection of 11.1 cm (by 18% greater than beam G1b), but caused by a 67% higher ultimate bending moment. It is seen from Fig. 3 that the deflection curves of beams G2 and G4 are almost parallel, as well as those of beams G3 and G5. The final deflections u of strengthened beams were by 32 ($l = 4$ m) and 42% ($l = 6$ m), than those of the strengthened beams subjected to the uniform loading. Greater deflections had beams strengthened with longer strips (15-23%).

4.3. Strains in Concrete

4.3.1. Strains in the tensioned concrete. The influence of external strengthening on the reduction in strain is illustrated in Fig. 4. It is pronounced especially for the G2 and G3 beams subjected to concentrated loads, which behaved almost in same ways as the control beam G1a up to an ultimate bending moment of about 50 kNm, after which stresses increased fast in beam G1a at a slight increase in the load, i.e., a stretching of the material happened. In contrast to this, with increase in load and appearance of the first cracks in the G2 and G3 beams, stress relaxation in their tension zone above the carbon strip occurred. The final strain in the G3 beam by 25% exceeded that in the G2 beam at an insignificant difference in their ultimate bending moments. The G4 and G5 beams, loaded with uniformly distributed loads, also deformed identically, almost elastically to a certain limit. After that, the strains grew much faster than the load. The final strain in the beam with longer strips (G5) by 25%

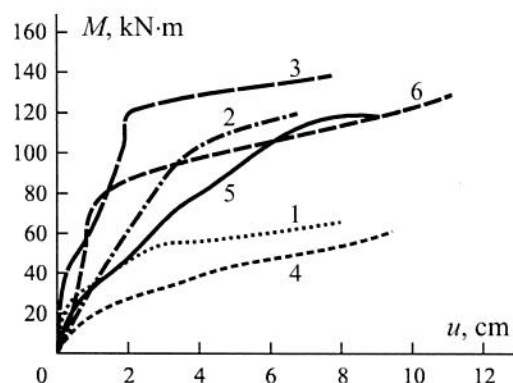


Fig. 3. Midspan deflections u of tested beams: G1a (···), G2 (---), G3 (- -), G1b (----), G4 (—), and G5 (— —).

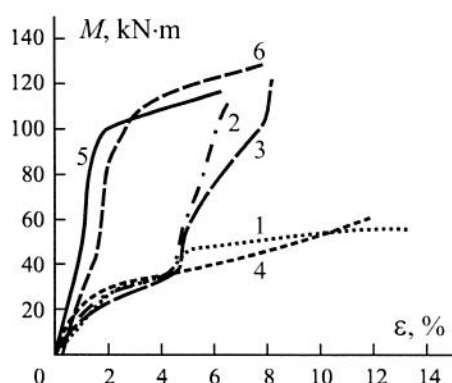


Fig. 4. Strains ε in the stretched concrete of tested beams. Designations as in Fig. 3.

exceeded that in G4 beam. The final strains of beams G2 and G4, strengthened by carbon strips of length 4 m, were almost the same. The same can also be said of beams G3 and G5, strengthened by carbon strips of length 6 m.

The strains in the strengthened beams were smaller than in the control ones, especially in those with shorter strips, — 1.6-2 times under the concentrated load and 1.5-1.9 under the uniformly distributed one.

4.3.2. Strains in the compressed concrete. It can be seen from Fig. 5 that the strains in the compression zone depended on the loading type. Namely, all three beams tested with a concentrated load (G1a, G2, and G3) showed a similar behavior: a high-growth in strains at small increments of ultimate bending moments. In the strengthened beams, after reaching the maximum strain of the G1a beam about 7‰, shear appeared in concrete. The relationship between the force and strain was almost linear, and the increases in the final strain were only 12 and 17% for the beams G2 and G3, respectively, in relation to the ultimate strain of the control beam G1a. The strains of G2 and G3 beams were several times higher than those of G4 and G5 beams. Their behavior was almost identical, and the ultimate strains differed by 20%. This unspecific behavior was caused by the relaxation of stresses in the tension zone after the appearance of first cracks.

4.4. Strains in carbon strips

Figure 6 shows the strains arising in carbon strips of different length during loading beams by the two types of loads and after unloading. As can be seen, they did not depend on loading types. The highest strains, as expected, occurred at the center of strips for all the beams tested. At strip ends, strains were negligible. After unloading, 51-66% of the ultimate strains were registered as residual ones.

4.5. Cracks in concrete

The appearance and development of cracks were monitored and mapped accordingly at each load increment, starting from the moment of the first crack until the fracture of beam.

In the beams tested with a concentrated load, the first crack load was 25 kN (for the control beam G1a), but in the strengthened beams G3 and G2, the first cracks appeared at the loads of 30 and 40 kN, respectively. The first crack in the

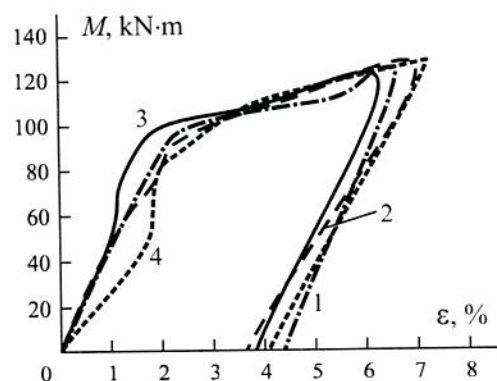
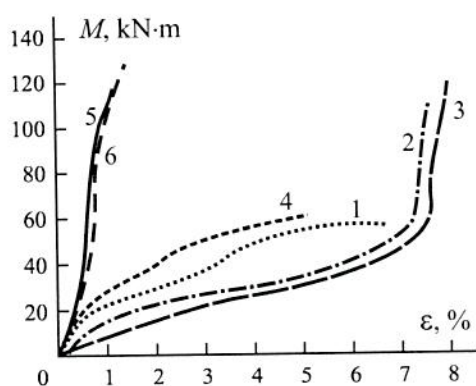


Fig. 5. Strains ε in the compressed concrete of tested beams. Designations as in Fig. 3.

Fig. 6. Strains ε in carbon strips. Designations as in Fig. 3.

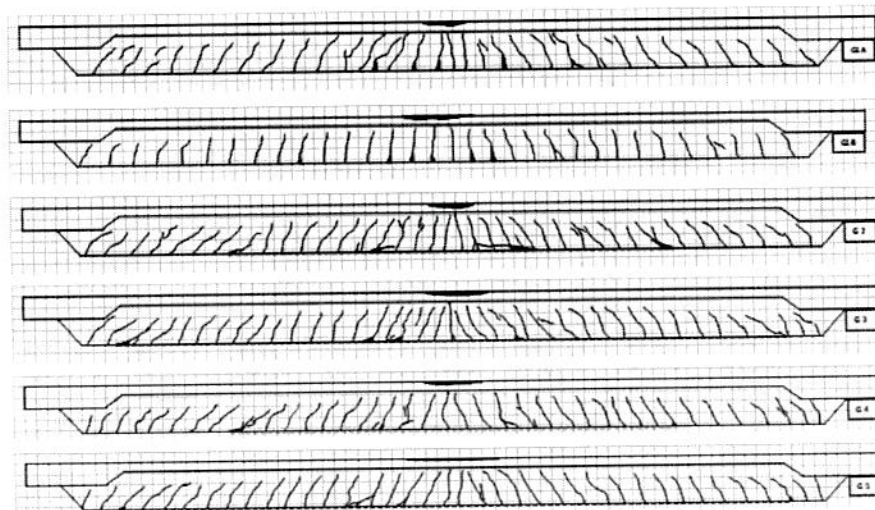


Fig. 7. Crack patterns.

uniformly loaded beams arose at 20 kN (in the control beam G1b), but in the strengthened beams G4 and G5, this occurred at about 40 kN.

The width of ultimate cracks slightly differed for all strengthened beams, but, compared with that in the control beam G1a, it was by up to 5.5 times smaller. The widths of the cracks in beams under uniformly distributed loads were by 20-45% greater than those in the beams loaded with concentrated loads. As expected, the number of cracks in the strengthened beams was higher, as can be seen in Fig. 7.

For the beams under concentrated loads, shear cracks were recorded in the ultimate limit state, which were clearly the result of increasing shear stresses.

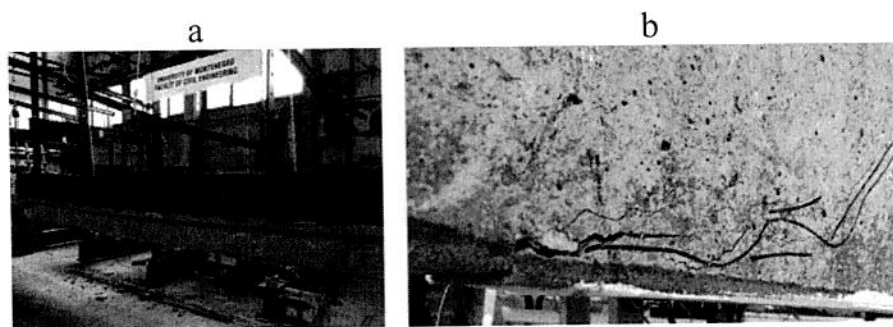


Fig. 8. Failure mode of beam G4.

4.6. Fracture mechanism

Analyzing the fracture modes of the beams G1a-G5 (see Table 1), it becomes clear that the external strengthening of the RC beams changed their fracture mechanism. The selected geometric parameters of sample cross sections, as well as their relations, had a significant influence on the fracture mechanism of the beams.

The CFRP strengthening caused a significant increase in the flexural strength of the beams in the ultimate limit state, which contributed to a growth in the shear stress and led to a fracture pattern different from the usual ones arising in tests on the small-scale samples.

Examination of the beam G4 showed that the conclusions made in [11, 14, 24, 25] regarding the influence of strengthening length on the fracture mode were true only partially. In those papers, it is asserted that the samples strengthened with a shorter strip will experience fracture by its separation sooner than those strengthened with a longer strip. According to these views, in the cases of longer strips, the fracture of samples occurs because the capacity of the strips has been exhausted and it disrupts.

A similar situation really occurred in our tests, but with only a partial separation of the strip on the fracture of beam G4 and mainly together with the concrete cover (Fig. 8). In the beams G3 and G5, strengthened with longer strips, the fracture of concrete occurred, so that the capacity of the strip had not been fully exhausted.

At the same time, the previous conclusions relative to the influence of loading type on these fracture modes were partly refuted. The authors of paper [14] assert that, in the case of shorter strengthening strips, the fracture mechanism of beam is similar in both cases — the separation of strip at its ends. According to them, RC beams strengthened with longer strips generally behave better under uniformly distributed loads than under concentrated ones, because uniform loadings does not cause discontinuities in the force along them. This discontinuity is responsible for the separation/fracture of CFRP strip in its middle in the case of a concentrated load, while the fractures in concrete mainly happen in samples tested by uniform loading. An opposite situation occurred in our examination, where the beam G2 was tested by a concentrated load and the beam G4 by a uniform load (see Table 1).

5. Conclusions

In this work the effectiveness of a retrofitting system used to strengthen old, full-size reinforced concrete T-beams was studied. The strengthening schemes and load types were varied to determine the influence of various parameters on the overall behavior of test specimens. From the results found, the following conclusions were drawn.

The external strengthening of RC beams led to a significant increase in their flexural strength compared with that of control beams, especially under concentrated loads. However, neither of the two parameters considered (load type and strengthening length) had a great influence on the flexural strength of the beams.

This way of strengthening reduced deflections. For some beams, the final deflections were almost the same as for the control ones. However, for others, there were small variations, but always in accordance with the significant increase in the load-carrying capacity of the critical cross section in the strengthened beams. Larger final deflections were found for the beams strengthened with longer strips and subjected to a uniform load, also in accordance with increase in the load-carrying capacity of the critical cross section.

This testing proved that the CFRP strengthening reduced strains in the stretched concrete regardless of load type. It is also proved that a longer strengthening allows higher strains in the stretched concrete, with small differences in their ultimate bending moments, independent of load type. The effect of load type was obvious in the compressed concrete, because the strains in the beams loaded by a concentrated force were several times higher than those in the uniformly loaded ones. With increasing strip length, the ultimate strains varied only slightly, regardless of the load type. The strains in carbon strips were very similar for all beams, almost independent of the two parameters examined.

Observations of the development of cracks confirmed the previous conclusions that the external strengthening reduces crack widths. In the control beams, the width and spacing of cracks were within the limits expected. In the strengthened beams, these values were lower, as expected, in accordance with benefits from the strengthening. This means that the number of cracks in the strengthened beams was higher, but their widths were much smaller. External CFRP strengthening also reduced the negative effects caused by large reinforcement bars on crack patterns.

Our investigations did not reveal any indication pointing to the complete separation of CFRP strips, as it was observed in most of the previous experimental investigations; therefore, it was concluded that no lateral anchorage was necessary. It was also concluded that, in the case of strengthening simply supported beams, there was no need for CFRP strips longer than half of beam length, because there were no significant differences in the flexural strength of beams strengthened with longer strips. This refers to the bending tests, where no load exceeding 60% of the flexural strength is expected.

Based on all of the above-stated, it can be concluded that reinforced concrete beams of a certain age can be successfully, quickly, and simply strengthened with CFRP strips, while maintaining the required level of flexural capacity and serviceability, owing to their many advantages and good performance.

Acknowledgments. The authors would like to express their gratitude to the Engineering Chamber of Montenegro for the financial support and to the local construction company "Fidija" for donation of the strengthening material needed for this research.

REFERENCES

1. R. Folić and M. Malešev, "Održavanje i sanacija konstrukcija," *Materijali i Konstrukcije*, **48**, No. 4, 62-80 (2005).
2. O. Hag-Elsafi, A. Alampalli, and J. Kunin, "Application of FRP laminates for strengthening of a reinforced-concrete T-beam bridge structure," *Composite Structures*, **52**, No. 3-4, 453-466 (2001).
3. N. F. Grace, G. A. Sayed, A. K. Soliman and K. R. Saleh, "Strengthening reinforced concrete beams using fiber reinforced polymer (FRP) laminates," *Structural Journal*, **96**, No. 5, 865-875 (1999).
4. H. R. Sobuz, E. Ahmed, S. Hasan, and A. Uddin, "Use of carbon fiber laminates for strengthening reinforced concrete beams in bending," *International Refereed Journal of Engineering and Science*, **2**, No. 1, 45-53 (2011).
5. S. T. Smith and J. G. Teng, "FRP strengthened RC beams I," *Engineering Structures*, **24**, No. 4, 385-395 (2002).
6. Al. G. Chami, M. Theriault, and K. W. Neale, "Creep behaviour of CFRP-strengthened reinforced concrete beams," *Construction and Building Materials*, **23**, No. 4, 1640-1652 (2009).
7. J. Valivonis, T. Skuturna, and M. Daugevičius, "The load-carrying capacity of reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber composite in the tension zone subjected to temporary or sustained loading," in: P. Vainiūnas and E. K. Zavadskas (eds.), *The 10th International Conference "Modern Building Materials, Structures and Techniques": Selected papers*, Vol. 2, Vilnius: Technika, Lithuania, 818-825 (2010).

8. B. Gao, C. K. Y. Leung, and J. K. Kim, "Failure diagrams of FRP strengthened RC beams," *Composite Structures*, **77**, No. 4, 493–508 (2007).
9. A. R. Khaloo and A. Gharachorlou, "Numerical analysis of RC beams flexurally strengthened by CFRP laminates," *Iranian Journal of Civil Engineering*, **3**, No. 1, 1-9 (2005).
10. D. I. Kachlakevand and D. D. Mc Curry, Testing of full-size reinforced concrete beams strengthened with FRP composites: Experimental results and design methods verification, Final Report for Oregon Department of Transportation, Oregon (2000).
11. Y. T. Obaidat, Structural retrofitting of reinforced concrete beams using carbon fiber reinforced polymer, Licentiate Dissertation, Lund University, Lund (2010).
12. N. P. Holmer, Par Study of the Bond Between Fiber Reinforced Polymers and Concrete using Finite Element Analysis, Master's thesis, Marquette University, Milwaukee (2009).
13. V. M. Karbhari, "Durability of FRP composites for civil infrastructure myth, mystery or reality," *Advances in Structural Engineering*, **6**, No. 3, 243-255 (2003).
14. H. Thomsen, E. Spacone, S. Limkatanyu, and G. Camata, "Failure mode analyses of reinforced concrete beams strengthened in flexure with externally bonded fiber-reinforced polymers," *Journal of Composites for Construction*, **8**, No. 2, 123-131 (2004).
15. A. M. Malek, H. Saadatmanesh, and M. R. Ehsani, "Prediction of failure Load of RC beams strengthened with FRP plate due to stress concentration at the plate end," *ACI Structural Journal*, **95**, No. 2, 142-152 (1998).
16. J. Casas and J. Pascual, "Debonding of FRP in bending: Simplified model and experimental validation," *Construction and Building Materials*, **21**, No. 10, 1940-1949 (2007).
17. G. Yao and G. Teng, "Plate end debonding in FRP-plated RC beams I: Experiments," *Engineering Structures*, **29**, No. 10, 2457-2471 (2007).
18. P. C. F. Da Silva Duarte, Reinforced concrete beams strengthened with CFRP laminates: an experimental study on the effect of crack repair, Instituto Superior Tecnico, Universidade Tecnica di Lisboa, Lisbon (2011).
19. Y. T. Obaidat, S. Heyden, O. Dahlblom, G. Abu-Farsakh, and Y. Abdel-Jawad, "Retrofitting of reinforced concrete beams using composite laminates," *Construction and Building Materials*, **25**, No. 2, 591-597 (2011).
20. S. Lee and S. Moy, "Prediction of flexural strength of rc beams strengthened with carbon fibre reinforced polymer," *Science and Engineering of Composite Materials*, **14**, No. 3, 169-180 (2007).
21. J. Sim, "Structural performance of concrete t-beam bridge strengthened with fiber reinforced plastics, CFS, GFRP and AFS," *Science and Engineering of Composite Materials*, **13**, No. 1, 1-12 (2006).
22. G. Ramos, J. R. Casas, and A. Alarcón, "Normalized test for prediction of debonding failure in concrete elements strengthened with CFRP," *Journal of Composites for Construction*, **10**, No. 6, 509-519 (2006).
23. R. Sen, M. Shahawy, G. Mullins, and J. Spain, "Durability of carbon fiber-reinforced polymer /epoxy/concrete bond in marine environment," *ACI Structural Journal*, **96**, No. 6, 906-914 (1999).
24. R. Kotynia, "Bond between FRP and concrete in reinforced concrete beams strengthened with near surface mounted and externally bonded reinforcement," *Construction and Building Materials*, **32**, No. 1, 41-54 (2011).
25. T. Shit, Experimental and numerical study on behavior of externally bonded RC T-beams using GFRP composites, Master's thesis, National Institute of Technology, Orissa (2011).

Univerzitet Crne Gore
GRAĐEVINSKI FAKULTET
81000 Podgorica
Džordža Vašingtona b.b.



Tel: 020 245 014, 244 905
Fax: 020 241 903
Website: www.ucg.ac.me/gf
E-mail: gf@ucg.ac.me
Žiro račun: 510-278-79
530-13649-97

УНИВЕРЗИТЕТ ЦРНЕ ГОРЕ
ГРАЂЕВИНСКИ ФАКУЛТЕТ - ПОДГОРИЦА

Број 586
Подгорица 15.05.2020. год

**CENTAR ZA UNAPREĐENJE KVALITETA
ODBOR ZA DOKTORSKE STUDIJE**

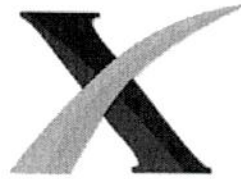
Predmet: Izvještaj o rezultatima provjere softverom za utvrđivanje plagijata

Komisija za doktorske studije Građevinskog fakulteta je, korišćenjem softvera za utvrđivanje plagijata Plagiarism Checker X Originality Report, izvršila provjeru doktorske disertacije pod nazivom: "Ponašanje AB konstrukcija ojačanih kompozitnim materijalima pod dugotrajnim opterećenjem", kandidata mr Nataše Kopitović Vuković, dipl.inž.građ, i utvrdila je da rad nema elemenata koji bi se mogli tumačiti kao plagijat, shodno Odluci o korišćenju softvera za utvrđivanje plagijata na Univerzitetu Crne Gore.

PREDSJEDNIK KOMISIJE
ZA DOKTORSKE STUDIJE,

Prof. dr Biljana Šćepanović





Plagiarism Checker X Originality Report

Similarity Found: 3%

Date: четвртак, мај 14, 2020

Statistics: 1163 words Plagiarized / 42880 Total words

Remarks: Low Plagiarism Detected - Your Document needs Optional Improvement.

UNIVERZITET CRNE GORE GRAĐEVINSKI FAKULTET / / Nataša Kopitović Vuković
PONAŠANJE AB KONSTRUKCIJA OJAČANIH KOMPOZITNIM MATERIJALIMA POD
DUGOTRAJNIM OPTEREĆENJEM doktorska disertacija Podgorica, 2020. godine
UNIVERSITY OF MONTENEGRO FACULTY OF CIVIL ENGINEERING / / Nataša Kopitović
Vuković BEHAVIOUR OF RC STRUCTURES STRENGTHENED WITH COMPOSITE
MATERIALS UNDER THE LONG-TERM LOAD Doctoral Dissertation Podgorica, 2020
Doktorand: Ime i prezime: Nataša Kopitović Vuković, dipl. inž. građ. Datum i mjesto
rođenja: 17. 07. 1975.

god, Podgorica, Crna Gora Postdiplomske studije: Građevinski fakultet Univerziteta Crne
Gore Postdiplomske magistarske akademske studije, Studijski program Građevinarstvo,
Konstruktivni smjer, 2008. god. Mentor: Prof. dr Radomir Zejak, dipl. inž. građ. Redovni
profesor Građevinskog fakulteta Univerziteta Crne Gore Komisija za ocjenu podobnosti
doktorske teze i kandidata: prof. dr Radenko Pejović, dipl. inž. građ.

Redovni profesor Građevinskog fakulteta Univerziteta Crne Gore prof. dr Radomir Zejak,
dipl. inž. građ. Redovni profesor Građevinskog fakulteta Univerziteta Crne Gore prof. dr
Vlastimir Radonjanin, dipl. inž. građ. Redovni profesor Fakulteta tehničkih nauka
Univerziteta u Novom Sadu Datum odbrane:

BIOGRAFIJA

Mr Nataša Kopitović Vuković, rođena je 17. jula 1975. godine u Podgorici, gdje je završila osnovnu školu i gimnaziju. Dobitnik je diplome Luča za osnovnu i srednju školu.

Diplomirala je na konstruktivnom smjeru Građevinskog fakultetu Univerziteta Crne Gore u julu 2001. godine. Magistarski rad pod nazivom „Uporedna analiza granične nosivosti elemenata od prethodno napregnutog betona, prema našim propisima i prema Evrokodu 2” odbranila je 2008. godine, na Građevinskom fakultetu Univerziteta Crne Gore, pod mentorstvom prof. dr Radenka Pejovića. Doktorske studije upisala je na Građevinskom fakultetu Univerziteta Crne Gore i položila sve predviđene ispite sa prosječnom ocenom A. Njeno doktorsko istraživanje je usmjereno ka primjeni novih materijala i tehnologija u građevinarstvu.

Od 01.04.2003. godine radi na Građevinskom fakultetu Univerziteta Crne Gore, gdje je, u zvanju saradnika, samostalno održavala vježbanja na brojnim predmetima na Katedri za materijale i konstrukcije. Angažovana je na osnovnim i specijalističkim studijama konstruktivnog smjera, kao i studijskog programa Menadžment u građevinarstvu. Takođe je dugi niz godina bila angažovana i kao saradnik na Arhitektonskom fakultetu.

Od početka angažovanja, Nataša Kopitović Vuković je radila i kao saradnik u Laboratoriji za ispitivanje materijala i konstrukcija.

Objavila je veći broj radova, izlaganih na naučnim i stručnim skupovima u zemlji i inostranstvu.

U okviru CEEPUS razmjene nastavnog kadra, boravila je na Tehničkom Univerzitetu u Beču, kao istraživač na projektu.

Obavljala je funkciju koordinatora za međunarodnu saradnju Građevinskog fakulteta Univerziteta Crne Gore (2 studijske godine).

Bila je član komisija za odbranu velikog broja diplomskih radova.

Objavila je veći broj radova, izlaganih na naučnim i stručnim skupovima u zemlji i inostranstvu.

Član je Inženjerske komore Crne Gore .

Član je tima za izradu Evrokodova.

Član je Tehničkog komiteta Instituta za standardizaciju.

Član je Grupe za ocjenu i nadzor (GON) Tijela za sertifikaciju građevinskih proizvoda (IG CERT).

Aktivno se koristi engleskim jezikom.

Udata je i ima dva sina.

BIOGRAFIJA I BIBLIOGRAFIJA

Nataša Kopitović Vuković, magistar građevinarstva, je od 2003. zaposlena kao saradnik na Građevinskom fakultetu u Podgorici.

Od početka angažovanja je radila i kao saradnik u Laboratoriji za ispitivanje materijala i konstrukcija.

Član je Inženjerske komore i član tima za izradu Evrokodova.

Član je Tehničkog komiteta Instituta za standardizaciju.

Član je Grupe za ocjenu i nadzor (GON) Tijela za sertifikaciju građevinskih proizvoda (IG CERT).

Aktivno se koristi engleskim jezikom.

NASTAVNO - PEDAGOŠKI RAD

U periodu od 01.04.2003. godine do danas samostalno je održavala vježbanja na predmetima Građevinski materijali, Građevinski materijali (Arhitektura) i Tehnologija betona, zatim Ispitivanje konstrukcija (dvije školske godine) a tokom jednog semestra na predmetu Zidane i drvene konstrukcije (Arhitektura). Na smjeru Menadžment u građevinarstvu angažovana je na osnovnim studijama na predmetima Građevinski materijali, Građevinska fizika i Energetska efikasnost, a na specijalističkim studijama na predmetima Ispitivanje građevinskih materijala, Tehnologija betona i Energetska efikasnost zgrada.

U okviru CEEPUS-ove razmjene nastavnog kadra, boravila je na Tehničkom Univerzitetu u Beču, kao istraživač na projektu.

Obavljala je i funkciju koordinatora za međunarodnu saradnju (2 školske godine).

Učestvovala je kao član komisije za odbranu velikog broja diplomskih radova.

Objavila je veći broj radova, izlaganih na naučnim i stručnim skupovima u zemlji i inostranstvu.

Njeno doktorsko istraživanje je usmjereno ka primjeni novih materijala i tehnologija u građevinarstvu.

NAUČNO - ISTRAŽIVAČKI RAD

Radovi na naučnim skupovima međunarodnog značaja

1. R. Zejak, N. **Kopitović-Vuković**: „Reološke karakteristike svježeg i očvrslog samozbijajućeg - SCC betona“, The 1st International conference “Civil engineering - science and practice”, Žabljak, 2006, pp.637-642, ISBN 86-82707-13-6.
2. R. Zejak, N. **Kopitović-Vuković**: „Calculation model for a case of experimental testing on slender RC columns“, The 1st International scientific symposium - Modeling of structures, Mostar, 2008, ISSN 1512-9322.
3. R. Zejak, N. **Kopitović-Vuković**, Anka Starčev-Ćurčin: „Uticaj obloge od armiranog betona na naponsko deformacijsko stanje čeličnih cijevi za vodovod“, The 3rd International conference “Civil engineering - science and practice”, Žabljak, 2010, pp.201-206, ISBN 978-86-82707-18-9.
4. R. Zejak, N. **Kopitović-Vuković**: „Komparativna analiza nosivosti na savijanje montažnog betonskog elementa za odvodnjavanje“, The 3rd International conference “Civil engineering - science and practice”, Žabljak, 2010, pp.195-200, ISBN 978-86-82707-18-9.

5. I. Bošković, B. Zlatičanin, N. Jaćimović, M. Krgović, M. Vukčević, R. Zejak, **N. Kopitović Vuković**: „Influence of the mineral content of clays as binders on the properties of the sintered product on the basis of electrofilter ash“, XXI Congress of Chemists and Technologists of Macedonia – CCTM 2010, Ohrid 2010, ICT-6, ISBN 9789989760105.
6. R. Zejak, N. Kopitović-Vuković, M. Krgović: „Possibility of using slag from steel-mill Nikšić in concrete production“, International scientific conference - People, buildings and environment, Krtiny, Czech Republic, 2010, pp.557-563, ISBN 9788072047055.
7. N. Kopitović-Vuković: Inovativna upotreba FRP materijala u betonskim konstrukcijama, The 4th International conference “Civil engineering-science and practice”, Žabljak, 2012, pp.1193-1199, ISBN 978-86-82707-21-9.
8. R. Zejak, N. Kopitović-Vuković, D. Damjanović: „Trajnost ab konstrukcija na primjeru gatova 1 – 4, Porto Montenegro u Tivtu“, The 4th International conference „Civil Engineering - science and practice“, Žabljak, 2012, pp. 1309–1314, ISBN 978-86-82707-21-9.
9. N. Kopitović-Vuković: Ispitivanja vremenskih deformacija na betonskim gredama armiranih kompozitnom armaturom, The 5th International conference “Civil engineering-science and practice”, Žabljak, 2014, pp.955-962, ISBN 978-86-82707-23-3.
10. Zejak R., Kopitović-Vuković N.: Eksperimentalna analiza ponašanja AB greda ojačanih kompozitnim materijalima, 11th International scientific technical conference – Contemporary theory and practice in building development, Banja Luka, 2015, pp.401-408, ISBN 978-99976-642-0-4.
11. Jevrić M., Kopitović-Vuković N. „Primjena euklidske geometrije na oblikovanje građene sredine – kratak pregled, karakteristike i ograničenja“, The 6th International conference “Civil engineering - science and practice”, Žabljak, 2016, pp.975-982, ISBN 978-86-82707-30-1.
12. Jevrić M., Kopitović-Vuković N. „Fraktalna analiza područja Podgorice i njene urbane granice“, The 6th International conference “Civil engineering - science and practice”, Žabljak, 2016, pp.983-989, ISBN 978-86-82707-30-1.
13. Jevrić M., Ćipranić I., Kopitović-Vuković N. „Fractals in civil engineering“, The 7th International conference “Civil engineering-science and practice”, Kolašin, 2020, pp.111-118, ISBN 978-86-82707-32-5.
14. N. Kopitović-Vuković, R. Zejak, M. Jevrić, N. Baša: Rheological model of FRP reinforced concrete, The 7th International conference “Civil engineering-science and practice”, Kolašin, 2020, pp.557-564, ISBN 978-86-82707-32-5.

Radovi na naučnim skupovima nacionalnog značaja

1. N. Đuranović, **N. Kopitović-Vuković**: Pregled trenutnog stanja primjene kompozitne armature u sanaciji konstrukcija, VII naučno-stručno savetovanje: Ocena stanja, održavanje i sanacija građevinskih objekata i naselja, Savez građevinskih inženjera Srbije, Zlatibor, 2011, pp.425-430. ISBN: 978-86-904089-9-3.

Radovi iz kategorije SCI, SCIE, SSCI i A&HCI

1. Jevrić M., Knežević M., Kalezić J., **Kopitović-Vuković N.**, Ćipranić I.: „Application of fractal geometry in urban pattern design“, Tehnički Vjesnik – Technical Gazette, pp 873-879, 2014.

2. **Vuković N.K.**, Jevrić M. & Zejak R.: Experimental analysis of RC elements strengthened with CFRP strips, *Mechanics of Composite Materials*, Vol. 56, No. 1, March 2020, pp.75-84. ISSN:1573-8922; DOI 10.1007/s11029-020-09861-x; <http://link.springer.com/article/10.1007/s11029-020-09861-x>

Uvodno predavanje na naučnom skupu nacionalnog značaja

1. B.S. Pavićević, R. Zejak, **N. Kopitović-Vuković**: „EVROKODOVI: Osnovni principi i njihov značaj u praksi“, Okrugli sto: Evropski standardi, Podgorica, 2009.
2. R. Zejak, **N. Kopitović-Vuković**: „EN 1991 – EVROKOD 1: Dejstva na konstrukcije, dio 1-3; Dejstvo snijega“, Okrugli sto: Evropski standardi - Evrokod 0 i Evrokod 1 - Osnove proračuna konstrukcija i dejstva na konstrukcije, Podgorica, 2010.

STRUČNI RAD

Naučni projekti

- R. Zejak, **N. Kopitović-Vuković**: „Arsenal, Tivat, jetties 1-4 - Survey of supervisory quality control of built-in concrete“, Podgorica, 2007.
- B.S. Pavićević, R. Zejak, **N. Kopitović-Vuković**: „EUROCODE 6 – Background and Applications, Design of Masonry Structures“, Izvještaj sa učešća na Workshopu u Briselu, Podgorica, april 2009. godine, 14 p., IKCG, ISBN 978 – 9940 – 9244 – 3 – 0.

Glavni projekti betonskih konstrukcija

- GLAVNI PROJEKAT REKONSTRUKCIJE DVIJE LAMELE U MOMIŠIĆIMA, projektant, Podgorica, 2003.
- GLAVNI PROJEKAT SPORTSKE DVORANE JU GIMNAZIJE ‘SLOBODAN ŠKEROVIĆ U PODGORICI, projektant, Podgorica, 2005.

Projekti betonskih radova

- Projekat betonskih radova za objekat „Atlas Capital Center“, Podgorica, 2008.
- Projekat betonskih radova za objekat „Onkologija i Radiologija“ Kliničkog Centra Crne Gore u Podgorici, 2008.
- Projekat betonskih radova za sportski objekat – halu u kompleksu policijske akademije – Danilovgrad, 2009.
- Projekat betonskih radova za hangar ‘Montenegro Airlines’ Aerodrom – Podgorica, 2009.
- Projekat betonskih radova za temeljnu ploču nosive čelične konstrukcije elektrofiltera u termoelektrani Pljevlja, 2009.

Ostale stručne aktivnosti:

- Kontrolna ispitivanja materijala i ocjena saglasnosti sa projektovanim zahtjevima za stambeno – poslovni objekat “UNISTAN” u Podgorici;
- Kontrola kvaliteta ugrađenog betona u konstrukciji gatova objekta „ARSENAL“–Tivat.
- Kao konsultant u firmi Checchi and Company Consulting – USAID, radila je 2 godine (2003-2005) na projektu Montenegro Judicial Reform Project (projekat renoviranja objekata pravosuđa u Crnoj Gori), kao jedini inženjer odgovoran za renoviranje 23 zgrade sudova u Crnoj Gori. Osim nadzora izvedenih radova, angažovanje se odnosilo na odabir i kontrolu upotrijebljenog materijala.

УНИВЕРЗИТЕТ ЦРНЕ ГОРЕ

Цетински пут б.б.
П. Факс 99
81000 ПОДГОРИЦА
ЈУГОСЛАВИЈА
ТЕЛЕФОНИ: (081) 265-538
225-986
225-984
Факс: (081) 242-301



UNIVERSITY OF MONTENEGRO

Cetinjski put b.b.
P.O. BOX 99
81000 PODGORICA
YUGOSLAVIA
Phone: (+381) 81 265-538
225-986
225-984
Faks: (+381) 81 242-301

Број: 01-95
Датум, 18.02. 2002.г.

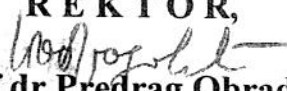
Ref: _____
Date: _____

Na osnovu člana 97. Zakona o Univerzitetu ("Sl.list RCG", br. 27/92 i 6/94) i člana 94. Statuta Univerziteta Crne Gore, Naučno-nastavno vijeće Univerziteta Crne Gore, na sjednici održanoj, 15.02.2002.godine donijelo je

ODLUKU O IZBORU U ZVANJE

Dr RADENKO PEJOVIĆ bira se u zvanje **redovnog profesora** Univerziteta Crne Gore za predmete: Prethodno napregnute i spregnute konstrukcije i Otpornost materijala na Građevinskom fakultetu u Podgorici.

PRAVNA POUKA: Protiv ove odluke može se uložiti žalba Naučno-nastavnom vijeću Univerziteta Crne Gore u roku od 15 dana od dana prijema iste.

REKTOR,

Prof.dr Predrag Obradović

Kratka biografija prof.dr Radenka Pejovića

Prof.dr Radenko Pejović, dipl inž. građ. redovni je profesor Građevinskog fakulteta, Univerziteta Crne Gore u Podgorici i redovni član i Predsjednik Akademije Inženjerskih Nauka Crne Gore.

Rođen je 23.januara 1950. godine u Miljkovcu u Opštini Plužine. Osnovnu školu je završio u rodnom mjestu, Srednju Građevinsku školu u Titogradu, a Građevinski fakultet u Sarajevu. Na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Sarajevu je magistrirao i doktorirao, gdje je počeo i svoju Univerzitetsku karijeru.

Predavao je na Građevinskom fakultetu u Sarajevu i Mostaru, a od 1992. godine na Građevinskom fakultetu u Podgorici na dodiplomskim, poslijediplomskim i doktorskim studijama. Na Univerzitetu Crne Gore obavljao je funkciju Dekana fakulteta (četiri mandata), bio je Prorektor, kandidat za Rektora, član Senata i Upravnog odbora.

Oblast istraživanja prof. Pejovića su beton i betonske konstrukcije, kao i sanacije i ojačanja građevinskih konstrukcija. Kao rukovodilac istraživanja ili istraživač učestvovao je u osam naučno –istraživačkih projekata.

Objavio je 8 knjiga, 5 priloga u monografijama i preko 150 radova u međunarodnim i domaćim časopisima i međunarodnim i domaćim konferencijama.

Sam ili sa saradnicima realizovao je veliki broj visokostučnih projekata.

REFERENCE IZ OBLASTI DOKTORATA (do 10 najvažnijih)

1. Pejovic J., Serdar N., **Pejovic R** and Jankovic S. (2019): Shear force magnification in reinforced concrete walls of high-rise buildings designed according to Eurocode 8, Engineering Structures, Vol.200 (2019),
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109668>
2. **Pejović R.**, Mrdak R.: SEISMIC ANALYSIS OF THE HIGH ARCH CONCRETE DAM OF THE WATER POWER-PLANT „PIVA“, Original scientific paper, Tehnicka Gazette, vol. 23 No.4 ISSN 1330-3651, pages 1067-1072, Slavonski Brod, Croatia, 2016. (SCIE)
3. **Pejović R.**, Serdar N., Pejović J., Tešović I., Bujišić M.: PRIMJENA PREDNAPREZANJA PRI REKONSTRUKCIJI I SANACIJI BETONSKIH MOSTOVA, Simpozijum 2016, Društvo građevinskih konstruktora Srbije, Zbornik radova str. 799-807, ISBN 978-86-7892-839-0, Zlatibor, 2016.
4. **Pejovic R.**, Pejovic J., Serdar N.: EFFECT OF PRESTRESSING ON PLASTIC BEHAVIOUR OF REINFORCED CONCRETE FRAME, Original scientific paper, Procedia Engineering, 117 (2015) 580/587, ISSN 1877-7058, 2015. (SCOPUS)
5. **Pejovic R.**, Mrdak R., Živaljević R., Mijušković O.: AN ANALYSIS OF SEISMIC RESISTANCE OF THE GRANČAREVO CONCRETE DAM, Original scientific paper, Građevinar, Journal of the Croatian association of Civil Engineers, udk: 627.825.001.2:550.34, pages 447-453, Zagreb, 2006. (SCIE)
6. **Pejović R.**: GRANIČNA NOSIVOST SPREGNUTIH BETONSKIH PRESJEKA, Časopis "Istraživanja" br. 1, Originalni naučni rad, UDK: 624.072.2.001, str. 1-11, Građevinski fakultet Podgorica, 1997.
7. **Pejović R.**: ULTIME LOAD OF COMPOSITE CONCRETE SECTIONS, 7th International Symposium, Ohrid, Republic of Macedonia, pages EC14/1-EC14/6, 1997.
8. **Pejović R.**: GRANIČNA NOSIVOST I EKSPERIMENTALNI REZULTATI ISTRAŽIVANJA SPREGNUTIH BETONSKIH KONSTRUKCIJA, (referat po pozivu), Stručni seminar savremena građevinska praksa '97, Zbornik radova, str. 201-217, Novi Sad, 1997.
9. **Pejović R.**: ANALIZA NAPONA I DEFORMACIJA U SPREGNUTIM BETONSKIM PRESJECIMA BEZ PRSLINE, Monografija "Istraživanja" posvećena petnaestogodišnjici rada fakulteta, ISBN 86-82707-01-2, str. 345-367, Građevinski fakultet Podgorica, 1995.
10. **Pejović R.**: NUMERIČKA ANALIZA UTICAJA TEČENJA I SKUPLJANJA U SPREGNUTIM BETONSKIM PRESJECIMA BEZ PRSLINA, Zbornik istraživačkih radova Instituta za materijale i konstrukcije Građevinskog fakulteta iz Sarajeva, Originalni naučni rad, UDK: 622.012+624+044, Knjiga 19, str. 15-37, Sarajevo 1990.



Број: 04-29/8
Нови Сад, 28. марта 2013. године

На основу члана 48. став 3. тачка 6. и члан 65. Закона о високом образовању („Службени гласник РС” бр. 76/2005, 100/2007-аутентично тумачење, 97/2008 и 44/2010) и члана 73. тачка 5. и члана 136. тачка 9. Статута Универзитета (Савет Универзитета, 28. децембар 2010. године) Сенат Универзитета на седници одржаној 28. марта 2013. године, једногласно је донео

ОДЛУКУ

о избору др Властимира Радоњанина у звање редовног професора на Факултету техничких наука Универзитета у Новом Саду, за ужу област Грађевински материјали, процена стања и санација конструкција.

Образложење

Након спроведеног поступка у складу са Законом о високом образовању, Статутом Универзитета и Правилником о начину и поступку стицања звања и заснивања радног односа наставника Универзитета у Новом Саду, Сенат Универзитета је размотрио и прихватио Одлуку о утврђивању предлога за избор у звање и заснивање радног односа Изборног већа Департамента за грађевинарство и геодезију од 25.02.2013. године Факултета техничких наука у Новом Саду и Закључка Стручног већа за техничко-технолошке науке од 18.03.2013. године и донео Одлуку као у диспозитиву.



ПРЕДСЕДНИК СЕНАТА

Проф. др Мирослав Весковић

Prof. dr Vlastimir Radonjanin, dipl.inž.građ.

Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Departman za građevinarstvo i geodeziju

Uža naučna oblast: Građevinski materijali, procena stanja i sanacija konstrukcija

Redovni je profesor na Fakultetu tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu. Predaje veliki broj predmeta na studijama Građevinarstva, Arhitekture i Upravljanja rizicima od katastrofalnih događaja i požara na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, u Banja Luci, Kraljevu i Nišu. Bio je rukovodilac doktorskih studija iz oblasti građevinarstva i rukovodilac akademskih specijalističkih studija "Energetska efikasnost u zgradarstvu".

Autor je više od 450 naučnih i stručnih radova, od čega 20 radova u časopisima na SCI listi. U međunarodnim časopisima na SCI listi citiran je više od 850 puta. Koautor je rada "GRAC - Green Recycled Aggregate Concrete", koji je nagrađen na međunarodnoj konferenciji u Edinburgu 2012 g. kao najbolji istraživački rad. Koautor je rada „Application of biomass ashes as supplementary cementitious materials in the cement mortar production“, koji je nagrađen kao najbolji rad na konferenciji u Stokholmu 2018 g. na međunarodnoj konferenciji "Architectural, Civil and Environmental Engineering". Član je "HIO tima", koji je osvojio prvo mesto na takmičenju za najbolju tehnološku inovaciju u Srbiji za 2007. godinu, koje je organizovalo Ministarstvo nauke. Držao je pozvana predavanja na drugim univerzitetima i istraživačkim centrima: Mc Gill Montreal – Kanada, Univerzitet u Osijeku - Građevinski fakultet, WJE Čikago – SAD, Lund Univerzitet – Švedska, Univerzitet u Tuzli, Univerzitet u Banja Luci.

Bio je predsednik ili član naučnog komiteta i organizacionog odbora mnogih međunarodnih i nacionalnih konferencija. Recenzent je u velikom broju međunarodnih časopisa. Šef je katedre za građevinske materijale, procenu stanja i sanaciju konstrukcija. Direktor je Departmana za građevinarstvo i geodeziju Fakulteta tehničkih nauka i bio je dugogodišnji rukovodilac Laboratorije za ispitivanje građevinskih materijala.

Bio je mentor pri izradi i odbrani 14 doktorskih disertacija, i član komisije za ocenu i odbranu velikog broja disertacija na Univerzitetu u Novom Sadu, Univerzitetu u Beogradu, Univerzitetu u Nišu, Univerzitetu u Banja Luci i Univerzitetu Crne Gore, a pod njegovim mentorstvom odbranjen je i veliki broj diplomskih, master, magistarskih i specijalističkih radova. Učestvovao je u većem broju međunarodnih (EUREKA, KOST, IPA, ERAZMUS, BILATERAL) i nacionalnih naučno-istraživačkih projekata (projekti nadležnog Ministarstva i Pokrajinskog sekretarijata). U poslednja dva ciklusa rukovodio je velikim naučnim projektima koji su ocenjeni kao najbolji projekti u Srbiji u oblasti građevinarstva, arhitekture i saobraćaja: Istraživanje savremenih betonskih kompozita na bazi domaćih sirovina, sa posebnim osvrtom na mogućnosti primene betona sa recikliranim agregatom u betonskim konstrukcijama, rukovodilac prof. dr Vlastimir Radonjanin, Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj (2008 - 2010) i Istraživanje mogućnosti primene otpadnih i recikliranih materijala u betonskim kompozitima, sa ocenom uticaja na životnu sredinu, u cilju promocije održivog građevinarstva u Srbiji, rukovodilac prof. dr Vlastimir Radonjanin, Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj (2011 - 2019). Pored navedenog nacionalnog projekta, rukovodilac je projekta Erasmus+ Capacity building in Higher Education: Knowledge for resilient society K-FORCE, finansiran od strane EU-EACEA (2016-2019), rukovodilac projekta bilateralne naučne i tehnološke saradnje između Crne Gore i Republike Srbije „Applying waste materials for Eco concrete“ (2019-2020), kao i član projektnog tima u projektima: ECO BUILD Agricultural waste – Challenges and bussiness opportunities (2017-2020), finansiran u okviru programa prekogranične saradnje „INTERREG-IPA CBC Croatia – Serbia“; Towards the next generation of standards for service life of cement-based materials and structures, finansiran u okviru COST ACTION TU1404 (2015-2018).

Počasni je član Društva građevinskih konstruktora Makedonije i Društva za ispitivanje i istraživanje materijala i konstrukcija Srbije. Bio je predsednik Društva za ispitivanje materijala i konstrukcija Srbije. Predsednik je Društva građevinskih inženjera Novog Sada. Predsednik je komisije za beton, armirani beton i prethodnonapregnuti beton Instituta za standardizaciju Srbije. Član je matičnog naučnog odbora za oblast građevinarstva, arhitekture i saobraćaja Republike Srbije. Bio je predsednik nadzornog odbora inženjerske Komore Srbije. Bio je član revizione komisije Srbije. Bio je član je etičkog odbora Univerziteta u Novom Sadu.

Posедуje licencu odgovornog projektanta (310) i licencu odgovornog inženjera za energetska efikasnost u zgradarstvu (318). Zamenik je predsednika komisije za polaganje stručnih ispita iz oblasti građevinskih konstrukcija i član Komisije za polaganje stručnih ispita iz energetske efikasnosti u zgradarstvu u inženjerskoj Komori Srbije. Najveći deo svoje profesionalne karijere posvetio je kompleksnim privrednim zadacima. Kao odgovorni projektant ili nosilac zadatka, u okviru stručnog tima Instituta za građevinarstvo, uradio je preko 150 elaborata o oceni stanja, ekspertiza, projekata sanacije i elaborata o ispitivanju konstrukcija. Obavljao je nadzor na izvođenju radova na sanaciji i dogradnji postojećih objekata i na gradnji novih objekata (stambene zgrade, administrativno-poslovne, industrijski objekti, mostovi, silosi, autoput, itd.). Pored toga, učestvovao je i u sledećim poslovima: revizija i tehnička kontrola projekata, tehnički prijem objekata, veštačenja iz oblasti građevinarstva i sl.

SPISAK OBJAVLJENIH RADOVA u časopisima na SCI listi

Radovi na SCI listi (M21-M23) - 20

Radovi M24 – 5

1. Džolev, I., Cvetkovska, M., Lađinović, Đ., **Radonjanin, V.** (2018): Numerical analysis on the behaviour of reinforced concrete frame structures in fire, Journal „Computers and Concrete“, Vol. 21, No. 6 (2018), pp. 637-647 (<https://doi.org/10.12989/cac.2018.21.6.637>) **M22**
2. Bulatović, V., Malešev, M., Radeka, M., **Radonjanin, V.**, Lukić, I. (2017): Evaluation of sulfate resistance of concrete with recycled and natural aggregates, Construction and Building Materials 152 (2017), pp. 614–631 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.161>) **M21**
3. Lukic, I., Malešev, M., **Radonjanin, V.**, Bulatovic, V. (2016): Basic Properties of Structural LWAC Based on Waste and Recycled Materials, Journal of Materials in Civil Engineering, American Society of Civil Engineers, (DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001696.) (ISSN 0899-1561) pp. 06016019-1-5 **M22**
4. Ćirović, G., **Radonjanin, V.**, Trivunić, M., Nikolić, D. (2013): Optimization of UHPFRC Beams Subjected to Bending Using Genetic Algorithms", Journal of Civil Engineering and Management, Taylor & Francis, 04.07.2014, Volume 20/4 pp. 527-536 (DOI:10.3846/13923730.2013.801908) (ISSN 1392-3730 / eISSN 1822-3605) **M21**
5. Malešev, M., **Radonjanin, V.**, Lukić, I., Bulatović, V. (2013): The effect of aggregate, type and quantity of cement on modulus of elasticity of lightweight aggregate concrete, Arabian Journal for Science and Engineering, Sept. 2013, pp.1-8., (DOI 10.1007/s13369-013-0702-2) **M23**
6. **Radonjanin, V.**, Malešev, M., Marinković, S., Al Maly, A. (2013): Green recycled aggregate concrete, Journal "Construction and Building Materials", Volume 47, October 2013, pp. 1503–1511 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.076>) **M21**
7. Lukić, I., Malešev, M., **Radonjanin, V.**, Bulatović, V., Dražić, J. (2013): "Comparative LCA analysis of ordinary concrete beams and structural lightweight concrete beams", Journal "Building Materials and Structures - Građevinski materijali i konstrukcije", Vol. 56 (2013), Društvo za ispitivanje i istraživanje materijala i konstrukcija Srbije, str. 2-15 (YU ISSN 0543-0798), (UDK: 06.055.2:62-03+620.1+624.001.5(497.1)=861) **M24**
8. Almadini, M., Kovacevic, D., **Radonjanin, V.** (2012): Comparative Analysis of Axially Loaded Composite Columns, Journal "Applied Mechanics and Materials", Vol. 147 (doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.147.99), pp. 99-104 **M24**
9. Malešev, M., **Radonjanin, V.**, Marinković, S. (2010): Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production, Journal Sustainability 2010, 2 (5), pp. 1204-1225. (ISSN 2071-1050); doi: 10.3390/su2051204. **M24**
10. Folić, R., **Radonjanin, V.** (1998): Experimental research on polymer modified concrete, ACI Materials Journal, VOL. 95 No. 4, July/August 1998, pp.463-470. **M21**

УНИВЕРЗИТЕТ ЦРНЕ ГОРЕ

Ул. Цетинска бр. 2
П. фах 99
81000 ПОДГОРИЦА
ЦРНА ГОРА
Телефон: (020) 414-255
Факс: (020) 414-230
E-mail: rektor@ac.me



UNIVERSITY OF MONTENEGRO

Ul. Cetinjska br. 2
P.O. BOX 99
81 000 PODGORICA
MONTENEGRO
Phone: (+382) 20 414-255
Fax: (+382) 20 414-230
E-mail: rektor@ac.me

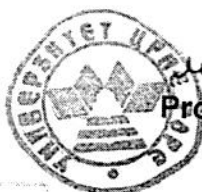
Број: 08-652
Датум, 15.04.2014 г.

Ref: _____
Date, _____

Na osnovu člana 75 stav 2 Zakona o visokom obrazovanju (Sl.list RCG, br. 60/03 i Sl.list CG, br. 45/10 i 47/11) i člana 18 stav 1 tačka 3 Statuta Univerziteta Crne Gore, Senat Univerziteta Crne Gore, na sjednici održanoj 14.aprila 2014. godine, donio je

ODLUKU O IZBORU U ZVANJE

Dr **RADOMIR ZEJAK** bira se u akademsko zvanje **redovni profesor** Univerziteta Crne Gore za predmete: Građevinski materijali i Tehnologija betona, na osnovnom akademskom studijskom programu Građevinarstvo i Primjena računara, na postdiplomskom specijalističkom akademskom studijskom programu Građevinarstvo, na **Građevinskom fakultetu** i Građevinski materijali, na osnovnim akademskim studijama, na Arhitektonskom fakultetu.



REKTOR

Predrag Miranović
Prof.dr Predrag Miranović

УНИВЕРЗИТЕТ ЦРНЕ ГОРЕ ГРАЂЕВИНСКИ ФАКУЛТЕТ - ПОДГОРИЦА			
Приймљено 14.04.2014			
Орг. јединица	Број	Приймљено	Вриједност
	552		

Kratka biografija prof.dr. Radomira Zejaka

Rođen sam 11. 01. 1962. godine u Baricama, opština Bijelo Polje. Osnovnu i srednju školu sam završio u Bijelom Polju. Za postignute rezultate u toku školovanja sam nagrađen diplomom „Luča I“. Na Građevinski fakultet Univerziteta „Veljko Vlahović“ u Titogradu upisao sam se školske 1981/82. godine. Po upisu na fakultet, proveo sam godinu dana u JNA. Diplomirao sam 17. februara 1987. godine na Smjeru za konstrukcije, predmet Betonske konstrukcije, sa ocjenom 10 i prosječnom ocjenom u toku studija 8.54.

U februaru 1987. godine upisao sam postdiplomske studije na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu na Odsjeku za Betonske konstrukcije. Magistarski rad sam odbranio 10. februara 1993. godine iz oblasti armiranobetonskih konstrukcija, pod naslovom: „Prilog rješenju problema granične nosivosti vitkih armiranobetonskih elemenata“, (mentor prof. dr Mirko Aćić). Doktorsku disertaciju, čiji je naslov „Prilog analizi vitkih armiranobetonskih elemenata sa kosim savijanjem“ (mentor prof. dr Mirko Aćić), odbranio sam 11. februara 2003. godine, takođe na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu.

Dobitnik sam priznanja Jugoslovenskog društva građevinskih konstruktera (JDGK) za najbolje ostvarenje u oblasti građevinskog konstrukterstva - naučno djelo za 2003. godinu u SRJ, za doktorsku disertaciju „Prilog analizi vitkih armiranobetonskih elemenata sa kosim savijanjem“.

U okviru studijskih boravaka ili kao istraživač na Projektima boravio sam na nekoliko univerziteta i instituta među kojima su: TU Wien - Institut für Stahlbetonbau, La Sapienza - Roma, University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy – Sofia, Tsinghua University – Beijing.

Kao predsjednik Tehničkog komiteta: TK 002 – Eurokodovi, u okviru Implementacije jedinstvenih Evropskih propisa u građevinarstvu (EN), učestvovao sam na više skupova u organizaciji Evropske Komisije (CEN, TC-250, JRC), tj. na Workshopovima u Briselu, Lisabonu, Berlinu, Beču, Dublinu i Milanu.

Znanje stranih jezika: engleski, ruski.

REFERENCE IZ OBLASTI DOKTORATA (do 10 najvažnijih)

1. Vuković N.K., Jevrić M. & **Zejak R.**: Experimental analysis of RC elements strengthened with CFRP strips, *Mechanics of Composite Materials* 56(1), 2020, pp.75-84. ISSN:1573-8922; DOI 10.1007/s11029-020-09861-x.
2. N. Baša, M. Ulićević, **R. Zejak**: „Experimental Research of Continuous Concrete Beams with GFRP Reinforcement“, *Advances in Civil Engineering*, Article ID 6532723, 2018., 16 pages.
3. **R. Zejak**, I. Nikolić, D. Blečić, V. Radmilović, V. R. Radmilović: „Mechanical and Microstructural Properties of the Fly-Ash-Based Geopolymer Paste and Mortar“, *Materials and Technology*, Vol.47, No. 4, 2013, , p. 535 – 540, UDK: 678.86, ISSN 1580-2949, Ljubljana, Slovenia.
4. M. Krgović, **R. Zejak**, M. Ivanović, M. Vukčević, I. Bošković, M. Knežević, B. Zlatičanin: „Properties of the Sintered Product Based on Electrofilter Ash Depending on the Mineral Content of Binder“, *Research Journal of Chemistry and Environment*, Vol. 15, No. 4, Decembar 2011, p. 52–56, ISSN 0972-0626, Indore, India. (vodeći autor).
5. I. Nikolić, **R. Zejak**, I. J. Častvan, Lj. Karanović, V. Radmilović, V. R. Radmilović: „Influence of Alkali Cation on the Mechanical Properties and Durability of Fly Ash Based Geopolymers“, *Acta Chimica Slovenica*, No. 3, Vol. 60, 2013, p.636 - 643, ISSN 1318-0207.
6. I. Nikolić, D. Đurović, **R. Zejak**, Lj. Karanović, M. Tadić, D. Blečić, V. R. Radmilović: „Compressive Strength and Hydrolytic Stability of Fly Ash – Based Geopolymers“, *Journal of the Serbian Chemical Society*, No. 6, Vol. 78, 2013, p.851 - 863, ISSN 0352-5139.
7. I. Nikolić, D. Đurović, D. Blečić, **R. Zejak**, Lj. Karanović, S. Mitsche, V. R. Radmilović: „Geopolymerization of Coal Fly Ash in the presence of Electric Arc Furnace Dust“, *Minerals Engineering*, Vol. 49, 9. April 2013, p. 24 - 32, ISSN 0892-6875.
8. M. Krgović, M. Knežević, M. Ivanović, I. Bošković, M. Vukčević, **R. Zejak**, B. Zlatičanin, S. Đurković: „The Properties of Sintered Product Based on electrofilter ash“, *Materials and Technology*, vol.43, No. 6, 2009, , p. 327 – 331, UDK: 669+666+678+53, ISSN 1580-2949, Ljubljana, Slovenia.
9. I. Bošković, M. Vukčević, M. Krgović, M. Ivanović, **R. Zejak**: „The Influence of Raw Mixture and Activators Characteristics on Red-Mud Based Geopolymers“, *Research Journal of Chemistry and Environment*, Vol. 17, No. 1, January 2013, p. 34–40, ISSN 0972-0626, Indore, India.
10. M. Vukčević, D. Turović, M. Krgović, I. Bošković, M. Ivanović, **R. Zejak**: „Utilization of Geopolymerization for Obtaining Construction Materials Based on Red Mud“, *Materials and Technology*, vol.47, No. 1, 2013, p. 99 – 104, UDK: 66.095.26:691: 539.411, Ljubljana, Slovenia.

PREGLED TRENUTNOG STANJA PRIMJENE KOMPOZITNE ARMATURE U SANACIJI KONSTRUKCIJA

Nataša Kopitović Vuković, Nebojša Đuranović

Građevinski fakultet Univerziteta Crne Gore, Cetinjski put bb, Podgorica. nataly@ac.me

REZIME

Ovaj rad ustvari predstavlja pregled sadašnje i buduće upotrebe FRP kompozitnih materijala u građevinskoj infrastrukturi, nastao kao osvrt na značajni porast njihove primjene u posljednje tri-četiri decenije. U radu su navedene vrste konstrukcija koje su nastale od FRP kompozitnih materijala, kao i najpovoljniji način korišćenja kompozita u građevinarstvu. U zaključku rada se objašnjava ključ uspjeha naprednih kompozitnih polimjera u građevinskoj infrastrukturi i predlažu se područja u kojima se, ukoliko su upotrijebljeni na inovativan način, mogu ubuduće koristiti s velikom prednosti.

KLJUČNE RIJEČI: FRP, sanacija, građevinska infrastruktura, hibridne konstrukcije, inovacije

A SURVEY ON THE CURRENT USAGE OF FRP COMPOSITES IN REHABILITATION OF CONSTRUCTIONS

ABSTRACT

This paper is actually a review of present and future utilisation of FRP composite materials in civil infrastructure, due to the rapid growth of their application over the past three to four decades. Various types of structures, which have been developed from the FRP composite materials, were demonstrated in the paper, and also the most beneficial way to utilize composites in civil engineering. The paper concludes by summarising key successes of the advanced polymer composite in the civil infrastructure and suggests areas in which, if they are employed innovatively, FRP composites could be used with great advantage.

KEYWORDS: FRP, rehabilitation, civil infrastructure, hybrid structures, innovations

UVOD

Prije rasprave o postojećim i budućim kompozitnim konstrukcijskim sistemima u građevinarstvu, važno je poznavati karakteristike materijala koje ga čine atraktivnim u nekim oblastima gradnje, kao i druge karakteristike koje se moraju poboljšati, u cilju postizanja potpunog povjerenja u materijal.

FRP se zbog svojih prednosti (male težine, lakoće ugradnje, niskog održavanja, otpornosti na koroziju, visokog koeficijenta konstrukcione povoljnosti i niske cijene u odnosu na vijek trajanja) široko koriste u građevinarstvu, automobilskoj industriji i procesu modeliranja.

Objekti građevinske infrastrukture imaju uobičajeni životni vijek oko 100 godina. Neizbježno je da će se vremenom od konstrukcija očekivati da ispune zahtjeve koji prvobitno nijesu postojali, a koji su nastali prvenstveno usljed povećanja pokretnog i nepokretnog opterećenja i propadanja upotrijebljenog materijala. Savremeni vid projektovanja, praćen zahtjevima nove, moderne tehnike je takođe unio izmjene u sadašnje propise.

Pokazaćemo kako jedinstvene karakteristike FRP kompozita mogu biti iskorišćene na više načina:

- u cilju formiranja konstrukcija izrađenih samo od FRP kompozita;
- u kombinaciji s drugim inženjerskim materijalima za poboljšanje krutosti, čvrstoće i trajnosti samog kompozita i
- za stvaranje budućih generacija FRP građevinskih elemenata.

PRIMJENA FRP KOMPOZITNIH MATERIJALA

Hibridni konstruktivni sistem, sastavljen od optimalno kombinovanih FRP kompozita i tradicionalnih materijala kao što su beton i / ili čelik, su trenutno glavna tema interesovanja, sa stanovišta upotrebe kompozitnih materijala u izgradnji novih konstrukcija.

Navedene kombinacije mogu obrazovati razne strukturne forme, kao što su:

1. Kolovozna ploča i gornji stroj mosta izrađeni od FRP kompozita;
2. Sanacija AB greda spoljašnjim ojačanjem pločama i direktnom montažom FRP šipki na spoljnu površinu elementa;
3. Sanacija čeličnih greda spoljašnjim ojačanjem pločama;
4. Sanacija AB stubova korišćenjem FRP kompozita;
5. Armiranje betonskih greda i ploča korišćenjem FRP šipki.

Strukturna analiza i projektovanje ovih sistema u načelu ne predstavlja problem, dok odgovarajućim ispitivanjem, konstrukcijom i izradom, FRP kompoziti mogu produžiti životni vijek i značajno smanjiti troškove održavanja u odnosu na odgovarajuću konstrukciju od tradicionalnih materijala.

1. Kolovozna ploča i gornji stroj mosta izrađeni od FRP kompozita

Kolovozna ploča mosta je njegov najosjetljiviji elemenat, samim tim što je direktno izložena opterećenju od vozila, zatim hemijskim uticajima, kao i uticajima temperature i vlage. Prednosti njene zamjene sa FRP pločom su mala težina; otpornost na koroziju; brzo postavljanje, uz minimalno ometanje saobraćaja; velika čvrstoća, uz visoke koeficijente sigurnosti, kao i niži troškovi životnog ciklusa. Mala težina ovih ploča, kao i jednostavnost i brzina postavljanja, omogućavaju izvanrednu uštedu u vremenu i radu. Korak dalje je omogućila nova tehnologija postavljanja pomoću spona [Lee, 2007], kojom je dokazano da mostovska konstrukcija može biti zamijenjena u roku od nekoliko sati.

2. FRP sistem za spoljašnje ojačanje

- Ojačanje betonskih konstrukcija se može obaviti spoljašnjim oblaganjem pomoću

kompozitnih materijala. Ova tehnika se pokazala kao uspješna alternativa mnogo skupljoj zamjeni ovih konstrukcija. Njena efikasna primjena kod AB greda se vidi kroz veliki broj sprovedenih eksperimenata [Smith i sar., 2002]. Raspravljalo se i o smjernicama za buduća ispitivanja FRP kompozita u betonskoj proizvodnji [Porter i sar., 2007].

➤ FRP kompoziti svoju primjenu nalaze i u ojačanju prednapregnutih nosača, koji su skloni zamoru čelika. Da bi povećali graničnu nosivost na savijanje, ovi nosači iziskuju spoljašnje ojačanje pomoću karbonskih kompozitnih ploča (CFRP). U radu [Reed i sar., 2004] na primjeru oštećenog 30-godišnjeg betonskog nosača, dokazano je da se smičuća nosivost, kao i nosivost na savijanje, mogu bitno povećati ovim vidom sanacije.

➤ U poređenju sa ispitivanjima izvršenim na gredama, broj teorijskih ispitivanja ojačanja AB ploča pomoću FRP kompozita, ograničen je. Zato je za modeliranje njihovog ponašanja korišćen je metod konačnih elemenata, kao najefikasniji numerički metod. Utvrđeno je da se ovom vrstom ojačanja, nosivost ploče koja nosi u dva pravca, povećava i do 200 % [Ebead i sar., 2004]. Takođe je vršeno i upoređenje analitičkog i eksperimentalnog modela, pri čemu je utvrđena dobra usaglašenost dobijenih rezultata [Michel i sar., 2009].

➤ NSM tehnologija (Near Surface Mounted) za povećanje nosivosti na savijanje i smicanje oštećenih AB elemenata (kao i drvenih i zidanih), sastoji se u ugrađivanju FRP štapa, kružnog ili pravougaonog poprečnog presjeka, u betonsku površinu. Pri tom su ugrađeni elementi zaštićeni od uticaja spoljašnje sredine, tako što se potpuno pokrivaju prionljivom epoxy smolom. U radu [De Lorenzis i sar., 2001] dokazana je efikasnost ove vrste ojačanja, pri čemu je smičuća nosivost AB grede, bez čelične armature, porasla za 106%.

3. Sanacija čeličnih greda pomoću spoljašnjeg ojačanja

Korozija, zamor i nedostatak pravilnog održavanja su, uglavnom, glavni uzročnici propadanja čeličnih konstrukcija. Velika zatezna čvrstoća i modul elastičnosti karbonskih kompozitnih materijala (CFRP), ih čini materijalima idealnim za ojačanje čeličnih konstrukcija. Uspješnost ove metode zavisi prvenstveno od kvaliteta i ispravnosti veze kompozitni materijal - čelik, kao i od efikasnosti upotrijebljene prionljive materije.

4. Sanacija AB stubova korišćenjem FRP kompozita

U ovom slučaju, najveća pažnja je usmjerena ka ojačanju AB stubova, u cilju prihvatanja seizmičkog opterećenja. Naime, veliku zabrinutost izaziva ponašanje konstrukcija koje nijesu projektovane na seizmičko, već samo na gravitaciono opterećenje. Ove konstrukcije posjeduju neodgovarajuću duktilnost, kao i nedostatak snage. Utvrđeno je da se ovim vidom sanacije može značajno poboljšati otpornost na poprečne deformacije stubova.

5. Armiranje betonskih greda i ploča korišćenjem FRP šipki. Šipke kao armatura betonskih greda i ploča

FRP šipke su se zbog svojih karakteristika nametnule kao logičan izbor zamjene čelične armature. Infrastruktura, mostovi, morska sredina ili hemijska postrojenja su primjeri primjene ove armature. Zbog svoje otpornosti na koroziju, upotreba FRP šipki može smanjiti troškove održavanja i sanacije, dok se njihova magnetna neutralnost može iskoristiti kada se žele izbjeći smetnje od magnetnog polja. Zbog različitih mehaničkih svojstava, ponašanje FRP armature se prilično razlikuje od ponašanja tradicionalne čelične. Takođe i trajnost ovih šipki nije jasna tema, pa čak teži da bude i kompleksnija od korozije čelika, zato što na degradaciju materijala utiču komponente kompozitnog materijala. Stoga su mnoga istraživanja sprovedena na tu temu [Ceroni i sar., 2006], u cilju obezbjeđivanja pouzdanih pravila, koja bi se implementirala u propise.

Američki Institut za beton (ACI), izdao je 2008. godine dva nova Priručnika za armaturu u betonu:

- Odredbe za projektovanje uz upotrebu FRP kompozitnih šipki;
- Odredbe za karbonsku i staklenu FRP armaturu u betonu.

SMJERNICE ZA BUDUĆU UPOTREBU FRP KOMPOZITA U GRAĐEVINSKOJ INDUSTRIJI

Najjednostavniji način da se novi materijal uvede u konstrukciju i odatle se upoznamo sa njegovim mogućnostima, leži u zamjeni tradicionalnih materijala s novim. Inovacija u FRP kompozitnim materijalima osamdesetih godina prošlog vijeka, ostvarila je veoma brz napredak u građevinarstvu.

Najveće interesovanje je vladalo za kombinovanje FRP kompozita sa tradicionalnim materijalima, ali je i određeni broj istraživanja usmjeren ka "all FRP" konstruktivnim elementima, tj. onim elementima, uglavnom kod mostova i zgrada, izrađenim isključivo od kompozitnih materijala.

Glavni nedostaci FRP kompozita leže u njihovoj relativno krhkoj prirodi, u odnosu na tradicionalne građevinske materijale, kao i u relativnom neiskustvu nekih od FRP projektanata i, generalno posmatrano, izvođača konstrukcije, što je rezultiralo upotrebom visokih sigurnosnih faktora u projektovanju. Visoke cijene ovog materijala su još jedan faktor koji donekle ograničava njegovu veću primjenu, ali kada se u obzir uzme životni vijek konstrukcije i dugotrajnost materijala, cijena njegovog korišćenja je uglavnom niža od cijene tradicionalnih materijala.

Budućnost primjene FRP kompozita, kao i načini nadgledanja i praćenja konstrukcija tokom njihovog životnog vijeka u, veoma često, nepovoljnom okruženju, zavise od inovativnosti ideja.

U posljednje tri decenije je izloženo nekoliko interesantnih ideja koje su pokazale kako FRP kompoziti pružaju mogućnosti upotrebe tamo gdje tradicionalni materijali nijesu pogodni.

➤ Još davne 1987. godine profesor Urs Meier iz EMPA, Švajcarska, predložio je da se CFRP kompozitni materijali, tj. karbonski kompoziti, upotrijebe za izradu kolovozne ploče i kablova, potrebnih za izgradnju mosta preko Gibraltarovog moreuza. Imajući u vidu da bi čelični kablovi bili ograničeni u tom slučaju, jer nisu mogli imati podršku vlastite težine, a most je trebao obuhvatiti minimalni središnji raspon od 8.4 km, Meier je pokazao da bi upotreba komponenti od kompozitnih materijala značajno uticala na premošćavanje ograničavajućih raspona, i time je stvorio uslove za izgradnju takvog mosta.

Nekim kasnijim ispitivanjima je utvrđeno da su karbonski ugrađeni kablovi idealno rješenje u slučaju izrazito dugih rasponskih konstrukcija. Njihove karakteristike kao što su: mala specifična težina, izražena otpornost na zamor i koroziju, su im obezbijedile prednosti u upotrebi u mostovskim konstrukcijama. Specijalne mjere opreza su potrebne pri odabiru sistema ankerovanja ovih kablova.

➤ Ponašanje zgrada usljed dejstva eksplozije je uvijek aktuelno pitanje. Mnoge stare zgrade sa nearmiranim zidovima ispune, imaju malu nosivost na savijanje i krto ponašanje pri lomu, pa su samim tim i neotporne na opterećenja van svoje ravni. U radu [Casadei i sar., 2007] ispitivan je hibridni sistem, koji objedinjuje visoku čvrstoću FRP sistema sa duktilnošću poliuretanske smole, čije se izduženje kreće i do 400%. Na taj način se postiže sljedeće: zidovima ispune se obezbjeđuje neophodna snaga pri dejstvu opterećenja van njihove ravni; stvara se balistički sloj, koji hvata leteće krhotine, nastale usljed eksplozije; ojačani zidovi postaju deformabilni u dovoljnoj mjeri, da bi bili u stanju da rasipaju energiju a da ne dožive gubitak nosivosti.

➤ U radu [Asprone i sar., 2008], vršeno je ispitivanje pregrada od staklenih kompozita (GFRP), postavljenih u cilju zaštite aerodromske infrastrukture od zlonamjernih akcija ili prirodnih događaja. Sprovedeni testovi su utvrdili da su korišćenjem ovog vida zaštite obezbijedene visoke strukturne performanse, bez ometanja radio komunikacije. GFRP pregrade su u stanju da se odupru udarima eksplozije i da ublaže talas šoka.

➤ Recikliranje strukturnih kompozitnih materijala je veoma značajno, mada ima određena ograničenja. Proizvodni proces mora biti ispitan da bi se utvrdile eventualne izmjene u konstrukciji, a sve u cilju ponovnog korišćenja materijala. Američka vojska je naručila dva mosta, kapaciteta oko 130 tona, napravljena isključivo od recikliranog materijala - potrošačke i industrijske plastike. Ovakvi primjeri moraju biti sagledani kao odlični načini upotrebe FRP otpada.

Nedavno je ovaj otpad izazvao zabrinutost širom svijeta, sa stanovišta zaštite životne sredine. Mediji su objavili podatak da se oko devet tona FRP otpada generiše svaki dan u Puducherry-ju, gradu u Indiji, a njegovo spaljivanje bi iziskivalo intenzivne troškove, a ujedno bi izazivalo i zagađenje vazduha. Komitet za kontrolu zagađenja u Puducherry, Odjeljenje za nauku, tehnologiju i životnu sredinu (DSTE), pronašao je način upotrebe ovog otpada u izradi opeke. Istražene su mogućnosti dobijanja cigle II klase, korišćenjem FRP otpada, zajedno sa elektrofilterskim pepelom iz obližnje elektrane, gipsom, pijeskom, krečom i vodom. FRP cigle ispunjavaju propisane standarde u pogledu čvrstoće i upijanja vode i mogu se koristiti za posebne građevinske svrhe.

➤ Primjer novog, inovativnog načina upotrebe kompozita je zamjena cijevi postojećeg cjevovoda, bez skupih iskopa. Zbog eliminisanja značajnih troškova usljed korozije metalnih cijevi vodovoda i kanalizacije, industrijskih pogona i električnih pomoćnih pogona, kompozitne FRP cijevi, otporne na koroziju, su se pokazale kao idealna zamjena.

➤ Primjena podvodne sanacije korišćenjem FRP omotača, pokazala se kao sporna. Naime, da bi popravka imala stalan karakter, neophodno je, osim cjelokupnog oštećenog betona, ukloniti i uzrok nastanka oštećenja. Naime, agresivni uslovi sredine izazivaju koroziju čelika u betonskom elementu, tako da je nakon popravke neizvjesno šta se dešava unutar FRP omotača.

➤ Proces praćenja stanja konstrukcije (SHM-structural health monitoring) je, u posljednjih nekoliko godina, izazvao značajan interes u mnogim sferama. Cilj ove metode je da se, korišćenjem strukturno integrisanih senzora, otkrije oštećenje i prati njegov razvoj, kako bi se obezbijedilo pravovremeno upozorenje, kao i dobile informacije neophodne za uspješnu intervenciju. Široko je rasprostranjena upotreba optičkih senzora, na bazi vlakana, koje karakteriše elektromagnetska neutralnost, mala težina i lakoća ugradnje, i oni nas izvještavaju o veličini deformacija i pomjeranja, o opterećenju, vlazi, širini prslina itd. Na bazi podataka dobijenih SHM metodom zasnovani su i mnogi naučni radovi [Kuang i sar., 2009].

➤ Opštepoznato je da postojeće metode proizvodnje energije, sa stanovišta zaštite životne sredine, nijesu održive. Trenutno poznati izvori uglja i nafte i veličine njihovih depozita, su ograničeni. Osim toga, cijena tih goriva i dalje raste, pa su obnovljivi izvori energije postali racionalniji i profitabilniji [Heinberg i sar., 2009]. Energija od vjetra je trenutno najbrže rastući izvor energije u svijetu, pa su samim tim i divovske lopatice rotora na turbinama postale najbrže rastuća primjena kompozita.

ZAKLJUČCI

U radu je jasno naznačeno da će glavna upotreba kompozitnih materijala u doglednoj budućnosti biti u njihovom spoju sa tradicionalnim materijalima. Visoke čvrstoće i krutosti FRP kompozitnih

materijala zahtijevaće manje materijala za postizanje sličnih performansi kao kod tradicionalnih materijala, što će rezultirati smanjenjem korištenja resursa i smanjenjem otpada proizvodnje. Uopšteno, prednost FRP kompozita je njegova mogućnost da produži životni vijek postojećih konstrukcija, kao i da razvije nove, mnogo otpornije na uticaje starenja, atmosferilija, i degradacije u oštrim uslovima. U radu je istaknut značaj inovativnih ideja, u cilju smanjivanja troškova proizvodnje i uticaja na životnu sredinu. Takođe je neophodan razvoj propisa i standarda koji uključuju razmatranja o sigurnosti, izvođenju i održivosti, potrebni za prenos tehnologije iz laboratorije na tržište.

Na osnovu ranijih zaključaka, jasno je da bi glavni fokus istraživanja u primjeni FRP kompozita trebao biti na području izgradnje novih, racionalnih hibridnih struktura, inovativnih oblika i visokih performansi.

U budućnosti će vjerovatno najveća upotreba strukturnih kompozitnih FRP materijala biti u području građevinskih elemenata namijenjenih za projekte iskorištavanja energije iz vjetra, talasa, HE, geotermalne i solarne energije.

LITERATURA:

- Asprone D, Prota A, Parreti R, Nanni A. *GFRP radar-transparent barriers to protect airport infrastructures* (2008);
- Casadei P, Agneloni E. *Elastic systems for dynamic retrofitting of structures* (2007);
- Ceroni F, Cosenza E, Gaetano M, Pecce M. *Durability issues of FRP rebars in reinforced concrete members* (2006);
- De Lorenzis L, Nanni A. *Shear strengthening of RC beams with near surface mounted FRP rods* (2001);
- Ebead UA, Marzouk H. *Fiber-reinforced polymer strengthening of two-way slab* (2004);
- Heinberg R, Mander J. *Searching for a miracle: net energy's limits and the fate of industrial society* (2009);
- Kuang KSC, Quek ST, Koh CG, Cantwell WJ, Scully. *Plastic optical fibre sensors for structural health monitoring* (2009);
- Lee SU, Hong K-J. *Experiencing more composite-deck bridges and developing innovative profile of snap-fit connections* (2007);
- Michel L, Ferrier E, Agbossou A, Hamelin P. *Flexural stiffness modelling of RC slab strengthened by externally bonded FRP* (2009);
- Porter ML, Harries K. *Future directions for research in FRP composites in concrete construction* (2007);
- Reed CE, Peterman RJ. *Evaluation of prestressed concrete girders strengthened with carbon fiber reinforced polymer sheets* (2004);
- Smith ST, Teng JG. *FRP strengthened RC beams I* (2002).



Nataša Kopitović Vuković¹

INOVATIVNA UPOTREBA FRP MATERIJALA U BETONSKIM KONSTRUKCIJAMA

Rezime

Zbog prednosti koje posjeduje u odnosu na tradicionalne građevinske materijale, kompozitni materijali - vlaknima ojačana plastika (FRP), imaju širok spektar primjene u izgradnji. Upotreba kompozita, bilo za kompletnu konstrukciju ili u kombinaciji s čelikom, smanjuje stalno opterećenje i omogućuje izradu većih presjeka.

U ovom radu su opisani neki istraživački projekti, sprovedeni u cilju racionalnog korištenja FRP materijala u betonskim konstrukcijama, što bi rezultiralo njihovom značajnijom primjenom. Sljedeći veliki korak koji se želi postići je veća strukturna upotreba kompozita u izgradnji.

Ključne riječi

inovacije, FRP savitljiva armatura, FRP specifični profili, svekompozitne konstrukcije

INOVATIVE APPLICATION OF FRP MATERIALS IN CONCRETE STRUCTURES

Summary

Fibre reinforced plastic (FRP) composites are used in a wide range of applications in construction because of the benefits they provide over traditional building materials. The use of FRP, either for the complete structure or in combination with steel, reduces the dead weight and enables larger sections to be prefabricated.

This paper has described many recent and on-going research projects being carried out, aimed to the rational use of FRP in concrete structures, so that efficient use is made of it, and its use proliferates. The next big step we aspire to make is greater structural use of composites in construction.

Key words

innovations, C-bars, FRP specific profiles, all composite constructions

¹ Mr, dipl.inž.grad., Univerzitet Crne Gore, Građevinski fakultet, Džordža Vašingtona bb, Podgorica, nataly@ac.me

1. UVOD

Prihvatanje inovacija u građevinarstvu je veoma spor proces – dešavalo se da prođe 10-25 godina dok neka inovativna ideja prođe i postane prihvaćena od strane građevinske industrije. To je jedna od prepreka s kojom se susrijeću kompoziti na tržištu. Njihovu primjenu takođe otežava i značajan nedostatak ulaganja u postojeće inovativne tehnologije.

Osnovne prednosti kompozita leže u smanjenju težine, smanjenju nosive konstrukcije, te u izvrsnoj otpornosti na koroziju i truljenje, koji su glavni uzročnici smanjene trajnosti konstrukcija izgrađenih od drveta i čelika. Lakši materijali olakšavaju rukovanje tokom proizvodnje, smanjuju troškove instalacije, kao i troškove prevoza. Manje održavanja i popravki znači smanjenje troškova životnog ciklusa. Kompoziti takođe nude veću slobodu oblikovanja, što omogućava stvaranje složenih oblika.

Još jedan faktor koji ide u prilog kompozita je cijena korozije. Procijenjeni trošak korozije za američku industriju, koji je glavni uzrok oštećenja cjevovoda, iznosi preko 300 biliona dolara [4].

U nekim početnim aplikacijama kompoziti su se koristili kao "sekundarne konstrukcije" tj. mali dijelovi zgrada, kao što su prozori na kosim krovovima, nadstrešnice, vrata i fasade, pri čemu se noseća konstrukcija radila od konvencionalnog građevinskog materijala.

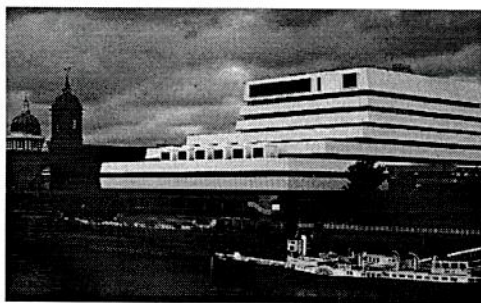
U nekim slučajevima FRP materijal je korišten za proizvodnju samopotpornih velikih struktura kao što su zakrivljene kupole za džamije, koje bi bilo mnogo teže i skuplje izvesti od konvencionalnog materijala.

U posljednjih nekoliko godina razvijene su složenije aplikacije kako bi se zadovoljila želja za dramatičnijim mogućnostima u gradnji. Tu su naročito zastupljene ljske i sistemi za oblaganje, koji uključuju složene oblike, a često daju fantastične rezultate.

2. PRIMJENA FRP MATERIJALA U KONSTRUKCIJI

Iako su nove aplikacije razvijene, FRP kompoziti su dugo vremena korišćeni u građevinarstvu, posebno za oblaganje fasada. Mondial House (sl.1), moderna zgrada visine 46 m, sagrađena je 1974.godine, u Londonu, na obalama rijeke Temze, u futurističkom dizajnu, i gotovo u potpunosti je pokrivena bijelim FRP pločama [7]. Očekuje se da će FRP materijali lako dostići trajnost od 50-60 godina projektovanog vijeka objekta, pa su se stoga počeli koristiti za mostove s predviđenim životnim vijekom od 120 godina.

Proizvedena od strane raznih proizvođača, kompozitna armatura datira još iz 1987. godine. FRP šipke su se zbog svojih karakteristika nametnule kao logičan izbor zamjene čelične armature. Zbog svoje otpornosti na koroziju, njihova upotreba efikasno eliminiše probleme degradacije betona u konstrukcijama, pa se time smanjuju troškovi održavanja i sanacije. Četiri puta lakša od čelika, a samim tim lakša za korišćenje i čuvanje, ova šipka može proizvesti uštede i do 25% u odnosu na čelik, ukoliko se u obzir uzmu ukupni troškovi životnog ciklusa.



Slika 1. Mondial House

Međutim, kad se FRP šipke jednostavno postave u beton kao direktna zamjena čeličnih šipki, to je nemoguće postići, zato što su deformacije u betonu niske (oko 0,35%), dok su u FRP-u visoke (najmanje 1,5%), što dovodi do skupog i neisplativog projektovanja. Rješenje ovog problema leži u prethodnom naprezanju FRP šipki, što predstavlja cilj najnovijih istraživanja u svijetu konstrukterstva [1].

Korišćenje kompozitnih materijala je naročito ekonomično u oblasti rekonstrukcije tj. kao FRP sistem za spoljašnje ojačanje konstrukcija. Ova tehnika se pokazala kao uspješna alternativa mnogo skupljoj zamjeni konstrukcija. Najčešće se vrši sanacija AB greda, stubova i ploča, kao i čeličnih greda, i to spoljašnjim ojačanjem kompozitnim pločama ili direktnom montažom FRP šipki na spoljnu površinu elementa.

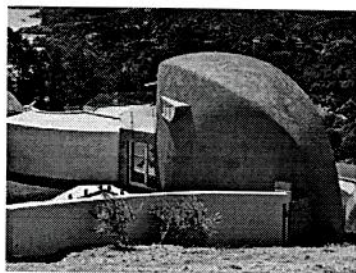
3. INOVATIVNA UPOTREBA FRP MATERIJALA

Veliki broj evropskih kompanija se udružilo u oktobru 2008.godine, u cilju zajedničkog rada na stvaranju novih strukturnih materijala. Fokus njihovog istraživanja je bio razvoj novih nanokompozita i stvaranje sistema za razvoj lakših materijala za strukturnu upotrebu. 24-mjesečni projekat bio je usmjeren na stvaranje zidnih zavjesa, koje se obično koriste za fasade zgrada, a koje bi zamijenile aluminijum i čelik. Očekuje se da nanokompoziti pruže bolju projektnu fleksibilnost, smanjenje težine, jednostavnost održavanja, otpornost na koroziju, visoke mehaničke karakteristike i dobro ponašanje pod uticajem požara.

Jedan od novih materijala, koji su veoma brzo našli svoju primjenu su FCP nosive, izolacijske ploče velike čvrstoće, koju daju staklena vlakna impregnirana sa protivpožarnom epoksidnom smolom. Punjena pjenom, FCP se koriste za izgradnju greda, stubova, profila, krovnih panela, kao i spoljašnjih i unutrašnjih zidova, pri čemu se strukturna funkcija daje i unutrašnjim zidovima, i na taj način omogućava uklanjanje greda u mnogim projektima. U narednih nekoliko godina u Americi je planirana izgradnja 32 000 energetski efikasnih kuća, korišćenjem FCP ploča. Univerzitetska ispitivanja pomoću softvera za simulaciju energije, pokazali su da će kuća od FCP ploča predviđene površine 111,5 m² koristiti 61% manje energije od iste izgrađene od konvencionalnih materijala.

Sve veću primjenu nalaze svekompozitne konstrukcije kompletno izrađene od kompozitnih materijala. Inovativna kuća izrađena u Brazilu od FRP kompozitnih materijala je predstavljena na najvećem sajmu građevinarstva u Latinskoj Americi, FEICON BATIMAT 2010 [8]. Kuća u kalifornijskom zalivu, površine 37 m², ima kompozitne

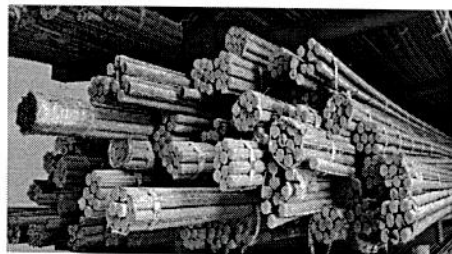
zidove sa staklenim vlaknima od poliestera, kao i polistirena i poliuretana, sa ispunom od pjene (sl.2). Sudije iz Američkog udruženja proizvođača kompozita (ACMA) su istakli da ova konstrukcija pokazuje da svekompozitni stambeni objekat može zadovoljiti međunarodne standarde za gradnju, uključujući i veću otpornost na požar od propisane.



Slika 2. Kreyslerova nagrađena California Bay House

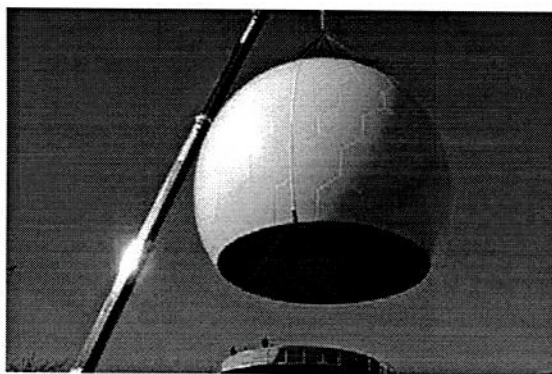
Sistem za armiranje i monitoring, nazvan Inteligentni kompozitni seizmički tapet, osvojio je JEC 2010 - nagradu za inovaciju u kategoriji projektovanja i građenja. Multiaksijalni tekstil s integrisanim optičkim senzorima je obložen s nano česticama - unaprijeđenim polimerima za trajnost. Tkanina je položena u malter u cilju jačanja i obnove zgrada u seizmički aktivnim područjima, a podaci neophodni za praćenje stanja konstrukcije se dobijaju iz senzora. Seizmički tapet je razvijen od strane grupe kompanija udruženih u cilju stvaranja inteligentnih tkanina za zaštitu građevinske infrastructure, osjetljive na potrese i druge prirodne nepogode.

Savitljiva armatura - proizvod pod nazivom C-bar (kompozitna šipka), proizvedena je u Oregonu, SAD-u, gdje je nedavno otvoren novi proizvodni pogon, koji će služiti kao svjetski centar za obuku za tehničare [8]. Patentirani proces proizvodnje omogućuje ovim šipkama da se savijaju u određene oblike u toku proizvodnje, a time se eliminiše jedan od glavnih nedostataka FRP šipki. Proizvod je napravljen od vlaknima armiranog polimera, koji sa 1/4 težine pokazuje 1,5 puta veću zateznu čvrstoću nego kod čelika (sl.3).



Slika 3. C-Bar kompozitne armaturne šipke

Velika sferna kupola radarske antene (sl.4), je prečnika 25 m, a sastoji se od livenih FRP sendvič panela, spojenih zavrtnjevima. Ova kupola radarske antene je u potpunosti sastavljena na terenu, a zatim je podignuta na toranj, pomoću veoma jednostavne dizalice, s obzirom da je konstrukcija bila vrlo lagana. Ovo rješenje omogućava FRP materijalu stvaranje vrlo ekonomične i geometrijski efikasne konstrukcije, koja se sastoji od jedne ljuske, bez unutrašnjeg okvira [5].

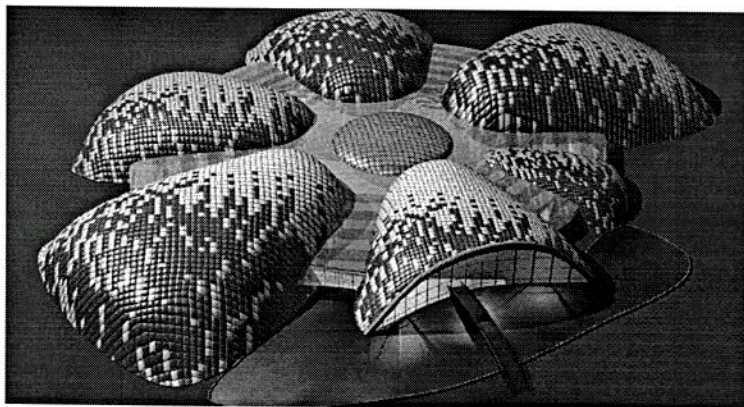


Slika 4. FRP kupola radarske antene

4. BUDUĆE MOGUĆNOSTI UPOTREBE KOMPOZITA

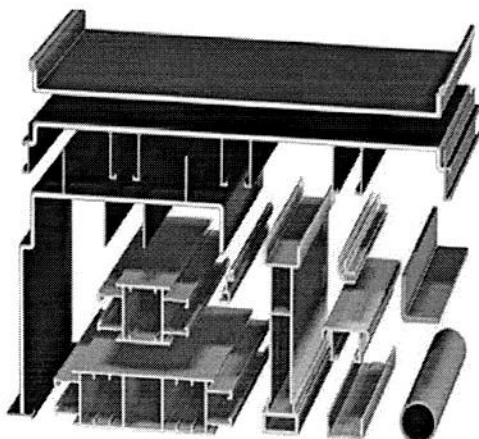
Sada je moguće izgraditi mnogo veće objekte korišćenjem FRP kompozita, uključujući i kompletnu noseću konstrukciju. Prednosti značajne uštede na težini će vjerovatno biti još izraženije na konstrukcijama velikih raspona, a arhitektonske slobode u upotrebi kompozita omogućiće izvođenje dramatičnih novih oblika. Predviđeno je, na primjer, da bi vrlo velik raspon krovova mogao biti ekonomično ostvaren korišćenjem kompozita, i to s rasponima od nekoliko stotina metara. Smanjenje noseće konstrukcije kod objekata sa velikim rasponima će obezbijediti značajno veću slobodu i fleksibilnost u korišćenju unutrašnjeg prostora i u budućnosti omogućiti eventualne promjene u namjeni tokom njihovog života, omogućavajući im efikasniju upotrebu.

Potencijalne primjene FRP materijala se mogu naći skoro svugdje - u školama, kancelarijama, prodajnim, industrijskim i izložbenim objektima, sportskim stadionima i sl. Sl. 5 pokazuje neke inovativne dizajne [5].



Slika 5. Moguće forme u kojima bi FRP materijal mogao naći primjenu

Kompanija Startlink Systems razvija modularni sistem gradnje za low-cost energetski efikasne kuće [6], koji se zasniva na ubacivanju specifičnih FRP profila malog raspona, koji pomoću zavrtnjeva i spojnice omogućavaju brzu montažu (sl. 6):



Sl. 6: FRP specifični profili

Najznačajnije prednosti ovih profila su sljedeće:

- otporni su na koroziju, kao i na napade insekata i razmnožavanje gljivica;
- stabilni su i inertni;
- mogu biti otporni na požar;
- jači su od čelika, i to sa samo 25% od težine čelika;
- posjeduju nisku toplotnu provodljivost;
- mogu biti isporučeni na gradilište potpuno završeni i upakovani, i na taj način izbjеći sve gubitke materijala;
- svaka komponenta teži manje od 50 kg, što ručno rukovanje čini sigurnim i jednostavnim;
- ne zahtijeva naročito obučenu radnu snagu;
- ne iziskuje upotrebu skele ili teške opreme.

Iz kompanije naglašavaju da kompletna kuća može biti izvedena od ovih profila. Predviđa se da bi ovaj koncept mogao pružiti ekonomski i ekološki prihvatljivije stanovanje, a i brzom montažom bi se drastično smanjio potreban rad na terenu. Takođe se očekuje da bi ovaj sistem mogao pružiti rješenja za privremene i demontažne objekte i skloništa za vojne i civilne potrebe. Svaka StartLink kuća će uštedjeti 16 tona ugljenika u odnosu na tradicionalne kuće.

FRP proizvodi nastavljaju da se probijaju na tržištu, a samim tim se javljaju njihove nove primjene, naročito u FRP umetnutim strukturnim oblicima. Primjer su dobro osmišljene ploče sa unutrašnjim rebrima, koja obezbjeđuju dobru čvrstoću, naročito pritisnu, i prilično dobru krutost. Ove ploče imaju uzdužne kanale za umetanje priključaka. Sistem je našao primjenu u nosivim strukturama, bez upotrebe potporne konstrukcije.

U ponudi je takođe i linija panela za izgradnju zgrada, i to zatvorene ćelije, sa ispunom od uretanske pjene, kao i ćelije bez ispune. Ovi paneli zahtijevaju potpurnu konstrukciju.

5. ZAKLJUČCI

FRP kompoziti su sada sve više zastupljeni u građevinskoj industriji, i nude značajan potencijal za veću primjenu u zgradama, uključujući i velike primarne konstrukcije. Budući da su FRP strukturni oblici, u većini slučajeva, skuplji od onih od konvencionalnog građevinskog materijala, moraju se na tržištu prodavati kao rješenja problema koja njihovi konkurenti ne mogu pružiti. Stoga je potrebno promijeniti metodologiju građenja kako bi se upotrebom FRP materijala osigurala efikasnija rješenja nego što su trenutno dostupna s tradicionalnim materijalima.

U radu je pokazano da FRP kompoziti imaju značajan potencijal da revolucionizuju izgradnju objekata, proizvedu dramatične nove oblike, a u nekim slučajevima efikasnije i isplativije konstrukcije.

Velika prepreka značajnijem korišćenju kompozita leži u nedostatku svijesti i prihvaćanja od strane građevinske industrije. Naime, usvajanje i racionalna upotreba FRP materijala će biti izazov za tradicionalne arhitekte i inženjere, koji se moraju upoznati sa materijalima i proizvodnim procesima, u cilju projektovanja efikasnih FRP konstrukcija.

Jasno je da FRP materijali neće zamijeniti konvencionalne materijale gradnje, i da će njihova primjena u početku biti u uskom području, ali moguć je i prodor na masovno tržište, kao što je stambena izgradnja.

Evidentno je da je ovo sektor sa značajnim potencijalom rasta, u kome se očekuje uzbuđljivi razvoj u budućnosti.

LITERATURA

- [1] L.C. Hollaway: A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties, 2010
- [2] L.C. Hollaway: Polymers, Fibres, Composites and the Civil Engineering Environment - A Personal Experience, 2010
- [3] T. Ibell, A. Darby, S. Denton: Research issues related to the appropriate use of FRP in concrete structures, 2008
- [4] A. Jacob: Composites in construction – gearing up for growth, 2007
- [5] D. Kendall: Building the future with FRP composites, 2007
- [6] D. Kendall: The business case for composites in construction, 2008
- [7] S.L. Lee, R. Jain: The role of FRP composites in a sustainable world, 2009
- [8] R. Stewart: Building on the advantages of composites in construction, 2010



Nataša Kopitović Vuković¹

ISPITIVANJA VREMENSKIH DEFORMACIJA NA BETONSKIM GREDAMA ARMIRANIM KOMPOZITNOM ARMATUROM

Rezime

U novije vrijeme se veća pažnja posvećuje ponašanju betonskih elemenata armiranih kompozitnom (FRP) armaturom na dugotrajna opterećenja, naročito gredama, jer je ovo područje, uprkos uloženom naporu u prethodne dvije decenije, praktično netaknuto. U ovom radu su prezentirani eksperimentalni rezultati nekih značajnijih dugotrajnih ispitivanja i data upoređenja sa ponašanjem greda identičnog gabarita, ali armiranih standardnim čeličnim armaturama. Takođe je izvršeno poređenje sa teorijskim predviđanjima odgovarajućih Pravilnika i date smjernice za buduća istraživanja.

Ključne riječi

betonska greda, FRP armatura, dugotrajno ispitivanje, tečenje

LONG TERM TESTING OF CONCRETE BEAMS REINFORCED WITH COMPOSITE BARS

Summary

In recent years, greater attention has been focused on the behavior of concrete elements, especially beams, reinforced with composite (FRP) bars, under the influence of long term loading. Despite efforts in past two decades, this is almost untouched field of research.

This paper presents experimental results of several significant long term studies and gives comparisons with the behavior of beams of the same dimensions, but reinforced with the ordinary steel reinforcements. The experimental results were also used to make a comparison with theoretical predictions of relevant Regulations. Directives for future research are proposed.

Key words

concrete beam, FRP bar, long term testing, creep

¹ Mr, dipl.inž.grad., Univerzitet Crne Gore, Građevinski fakultet, Cetinjski put bb, Podgorica, natalv@ac.m

1. UVOD

Današnji ubrzani razvoj, u svim područjima života ljudi, prati neizbježno i razvoj u građevinarstvu, koji nameće nove zahtjeve kao što su veća trajnost, veća čvrstoća, lakša gradnja i veća ekonomičnost građevinskih konstrukcija.

Armirani beton je još uvijek najčešće korišćen materijal u konstrukcijama, u kome je upotreba čelika za armiranje dugo vremena predstavljala jedinu mogućnost dostupnu projektantu određenog građevinskog objekta.

Poznato je da korozija predstavlja neizbježnu pojavu u ljudskom okruženju, s obzirom da trenutno oko 44% svjetske populacije živi na udaljenosti od oko 150 kilometara od obale. Korozija čelika u određenim uslovima sredine može dovesti do uništenja konstruktivnog elementa, vodeći ka velikim popravkama i troškovima rekonstrukcija. Građevinska industrija je, u cilju sprečavanja takvih troškova, sprovela nekoliko pokušaja, ali su svi bili ili previše skupi ili neefikasni.

Vremenom je došlo do ubrzanog istraživanja u oblasti primjene alternativnih materijala, kao glavne armature betonskih presjeka. Otpornost na koroziju vlaknima ojačane plastike – FRP materijala (Fiber Reinforced Plastics) bila je osnova za prihvatanje FRP armature, kao odgovarajuće zamjene čeliku.

Razvoj ove armature je sve do 70-tih godina predstavljao rezultat individualnih napora istraživača. Prva istraživanja na njenoj upotrebi, u građevinarstvu, su započeta 1978. godine, kada su testirani FRP kablovi za prednaprezanje. Nakon toga dolazi do značajnog porasta interesovanja projektanata i istraživača, a posljedica toga je naglo proširenje područja primjene FRP armature.

Infrastruktura, mostovi, morska sredina ili hemijska postrojenja su primjeri primjene ove armature, gdje je ona, zbog svojih visokih mehaničkih karakteristika, zauzela stabilnu poziciju.

Upotreba FRP šipki efikasno eliminiše probleme degradacije betona u konstrukcijama, zahvaljujući svojoj otpornosti na koroziju, pa stoga može smanjiti troškove održavanja i sanacije, dok se njihova magnetna neutralnost može iskoristiti kada se žele izbjeći smetnje od magnetnog polja.

Karakteristika ovih materijala, koja im omogućava raznovrsnu primjenu u građevinarstvu, je njihova izuzetno visoka čvrstoća na zatezanje. Proizvod je napravljen od polimera armiranog vlaknima, koji sa 1/4 težine pokazuje 1,5 puta veću zateznu čvrstoću nego kod čelika.

Jedan od glavnih nedostataka FRP šipki eliminisan je proizvodnjom savitljive armature – proizvoda pod nazivom C-bar (kompozitna šipka). Patentirani proces proizvodnje omogućuje ovim šipkama da se savijaju u određene oblike u toku proizvodnje.

Visoke cijene ovog materijala su faktor koji donekle ograničava njegovu veću primjenu. Međutim, imajući u vidu da je FRP armatura četiri puta lakša od čelika, a samim tim lakša za korišćenje i čuvanje, ova šipka može proizvesti uštede i do 25% u odnosu na čelik, ukoliko se u obzir uzmu ukupni troškovi životnog ciklusa.

Međutim, zbog različitih mehaničkih svojstava, naročito velikom odstupanju u vrijednostima modula elastičnosti, ponašanje FRP armature se prilično razlikuje od ponašanja čelične.

Takođe trajnost ovih šipki nije do sada dovoljno ispitana, pa čak teži da bude i kompleksnija od korozije čelika, zato što na degradaciju materijala utiču komponente

kompozitnog materijala. Stoga su očekivane i razlike u ponašanju konstrukcija armiranih kompozitnim šipkama (FRP RC) i konstrukcija armiranih čelikom (SRC).

2. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA

2.1. PREDMET ISTRAŽIVANJA

Pregledom literature utvrđeno je da se mali broj radova, na ispitivanju ponašanja betonskih greda armiranih FRP šipkama na dugotrajna opterećenja, odnosi na ispitivanja u stvarnim vremenskim okvirima. Naime, većina do sada sprovedenih eksperimentalnih istraživanja u svijetu bila je usmjerena na ispitivanja reoloških svojstava ovih elemenata u laboratorijskim uslovima, koji su, u uslovima povećane temperature i vlažnosti, simulirali postizanje ubrzanog starenja (accelerated tests). Stoga ponašanje ispitivanih uzoraka nije moguće preuzeti kao reprezentativno.

Zbog toga je predmet istraživanja, u užem smislu, upravo vremensko ponašanje grednih nosača, armiranih FRP šipkama, u prirodnim uslovima starenja.

Trenutno se, na više mjesta u svijetu, vrši veći broj istraživanja, pa se sa priličnom sigurnošću mogu očekivati i dalja poboljšanja samog materijala, kao i obezbjeđivanje pouzdanih pravila, koja bi se implementirala u propise. Razvoj propisa i standarda, koji uključuju razmatranja o sigurnosti, izvođenju i održivosti, je neophodan, kako bi se izvršio prenos tehnologije iz laboratorije na tržište.

S obzirom da postojeći pravilnici, za konstrukcije armirane čelikom, nijesu dovoljno fleksibilni, da bi se primijenili na konstrukcije armirane FRP armaturom, brojna istraživanja su usmjerena ka izradi novih pravilnika za projektovanje i proračun ovih konstrukcija.

Američki Institut za beton (ACI) je 2008.godine izdao dva nova Priručnika za armaturu u betonu:

Odredbe za projektovanje uz upotrebu FRP kompozitnih šipki

Odredbe za karbonsku i staklenu armaturu u betonu

Takođe su u upotrebi mnogi drugi standardi, kao što su kanadski CSA i evropski CEB FIP Bulletin iz 2006-te godine.

2.2. ANALIZA SPROVEDENIH EKSPERIMENTALNIH ISTRAŽIVANJA

2.2.1. UVODNE NAPOMENE

Pravilnici ACI 440.1R-06 i CSA-S-806-02 predlažu jednostavne procedure za proračun deformacija pod dugotrajnim opterećenjem. Međutim, oni ne uzimaju u obzir promjene uslova sredine, kao ni promjene mehaničkih karakteristika materijala, napr. korišćenjem različitih vrsta vlakana. Neke opšte metode, kao što je Metod efektivnog modula elastičnosti (EMM) ili Metod vremenski usklađenog efektivnog modula elastičnosti (AEMM), uzimaju u razmatranje neke parametre, bitne pri razmatranju vremenski zavisnog ponašanja, kao što su geometrija presjeka, karakteristike opterećenja (magnituda i dužina trajanja opterećenja, starost betona u trenutku opterećenja), kao i karakteristike materijala (modul elastičnosti betona i FRP armature, skupljanje i tečenje betona). Međutim, na ovaj

način se postupak proračuna znatno komplikuje. Ove metode su usvojene u nekim pravilnicima, kao što su Evrokod 2 i ACI 435.

Stoga je neophodno duboko razumijevanje glavnih parametara bitnih za proračun dugotrajnih deformacija.

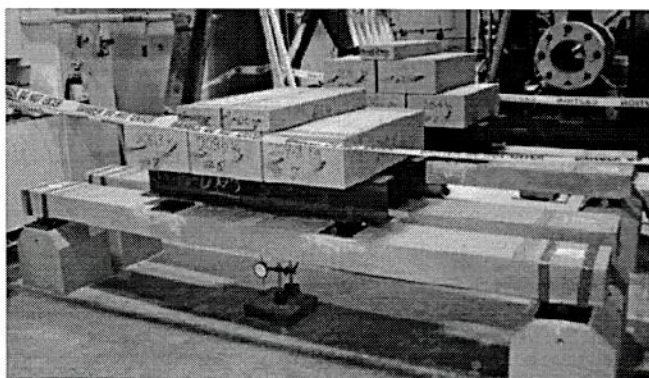
2.2.2. PRETHODNA EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

U radu [1] ispitivane su 2 grede dimenzija 152x152x2438 mm i 2 grede dimenzija 152x203x2438 mm, raspona 2286 mm. Grede su armirane karbonskim FRP šipkama (CFRP RC), i to dvostruko sa po 2 CFRP šipke, prečnika Ø7.5 mm. Nanošena su 4 različita nivoa dugotrajnog opterećenja, u trajanju od 2 godine.

Da bi izvršili ocjenu dobijenih rezultata, autori su razvili analitički metod procjene veličine deformacije tečenja za grede armirane karbonskom armaturom. Napravljen je i kompjuterski program za dobijanje vrijednosti trenutnih deformacija, kao i deformacija tečenja, koristeći metod vremenski usklađenog modula elastičnosti i odredbi Pravilnika ACI 209 i CEB-FIP Model Code 1990. Pri tom su uočene neznatne razlike kod sračunavanja deformacija za različite propise. Nakon sprovedene uporedne analize teorijskih i eksperimentalnih rezultata, a u cilju njihovih boljih usklađivanja, autori su predložili izraz za sračunavanje multiplikatora vremenskih deformacija, za grede armirane karbonskom armaturom, i na taj način korigovali odgovarajući izraz iz Pravilnika ACI 318.

U radu [2] ispitivane su 4 betonske grede, dimenzija 30/150/3300 mm, armirane staklenom armaturom (GFRP), prečnika #5 $\approx$ Ø16 mm. Dvije grede su opterećene na kratkotrajno, a 2 na dugotrajno opterećenje. U cilju sprovođenja uporedne analize, ispitano je 8 betonskih greda, armiranih čeličnom armaturom (SRC), prečnika Ø16 mm, i to 4 na kratkotrajno i 4 na dugotrajno opterećenje.

Na slici 1 je prikazan način nanošenja dugotrajnog opterećenja. Po dva uzorka su postavljena jedan pored drugog, na betonske oslonce, na rasponu od 3000 mm. Na svaki je postavljena čelična greda I profila, za raspodjelu opterećenja, čiji su oslonci postavljeni u trećinama raspona betonskih greda. Dugotrajno opterećenje je nanijeto postavljanjem 2 tipa betonskih blokova na gredu za raspodjelu opterećenja, pri čemu je ostvareno ravnomjerno opterećenje oba uzorka.



Slika 1. Izgled uzoraka opterećenih na dugotrajno opterećenje

Mjerni uređaj je postavljen na pod, na sredinu raspona svake grede, pa su odgovarajuće deformacije mjerene prije i nakon nanošenja opterećenja. Nakon toga,

deformacije su praćene tokom cijelog perioda trajanja opterećenja, što je u ovom slučaju bilo 360 dana.

Zaključci autora nakon sprovedenog istraživanja su sljedeći:

*Grede armirane kompozitnim šipkama (GFRP RC) su postigle niže vrijednosti krutosti nakon loma, u poređenju sa identičnim gredama armiranim čelikom (SRC), čime su ostvarile veće vrijednosti trenutnih deformacija, kao i deformacija tečenja u toku vremena.

*Deformacije tečenja, kao i trenutne deformacije, dostigle su i 2 puta više vrijednosti kod GFRP RC greda nego kod SRC greda, tako da je koeficijent tečenja, kod oba tipa greda, imao približno istu vrijednost.

* Korišćenjem odredbi Pravilnika ACI 440, precijenjene su vrijednosti koeficijenata tečenja, za oba tipa greda.

U radu [3] ispitivane su 4 grede, dimenzija poprečnog presjeka 180 x 280 mm, raspona 3200 mm. Dvije grede su armirane staklenim FRP šipkama (GFRP RC), a druge dvije ekvivalentnom količinom čelične armature (SRC). Nanošena su 2 različita nivoa opterećenja, u trajanju od 8 mjeseci, a zatim su upoređeni rezultati dobijeni ispitivanjem ponašanja ovih greda, pod dejstvom dugotrajnog opterećenja. Autori su koristili analitičke modele predviđanja trenutnih deformacija, kao i deformacija tečenja, da bi ih uporedili sa eksperimentalno dobijenim vrijednostima.

Zaključci autora nakon sprovedenog istraživanja su sljedeći:

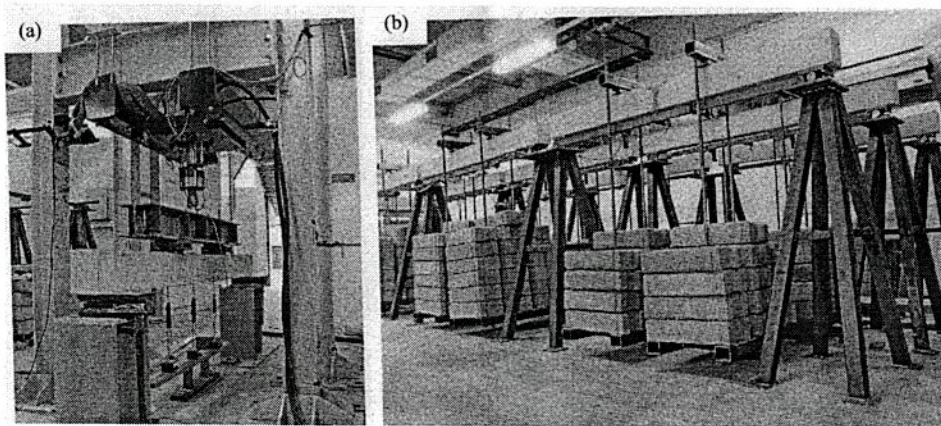
* Najbolje predviđanje trenutne deformacije, nastale usljed nanošenja dugotrajnog opterećenja, daje Pravilnik CEB-FIP Model Code 1990.

* Grede armirane GFRP armaturom doživljavaju 1.7 puta veće deformacije tečenja, odnosno 3.5 puta veće trenutne deformacije, u poređenju sa jednako opterećenim gredama armiranim čelikom. Dobijene vrijednosti ukazuju na to da je koeficijent tečenja kod GFRP RC greda 50% manji nego kod SRC greda.

U radu [4] ispitivano je 8 betonskih greda, dimenzija 140/190/2450 mm, armiranih staklenom armaturom (GFRP RC). Korišćene su po dvije GFRP šipke, prečnika Ø12 i Ø16 mm i čelične uzengije, prečnika Ø8 mm. U cilju sprovođenja uporedne analize, ispitane su 2 betonske grede, armirane sa po 2 čelične šipke (SRC), prečnika Ø10 mm.

Na slici 2 je prikazan način nanošenja dugotrajnog opterećenja. Prvo su uzorci - proste grede raspona 2200 mm, izložene su dejstvu 2 koncentrisane sile, na rastojanju 700 mm od oslonaca greda. Odmah nakon kratkotrajnog opterećenja, grede su postavljene u odgovarajuće ramove, i opterećene sa 2 nivoa opterećenja.

Tri mjerna uređaja (transducers) su korišćena za mjerenje deformacija, postavljeni jedan u sredinu raspona, a ostali na 400 mm od njega. Ova dva uređaja su, kod ispitivanja pri dugotrajnom opterećenju, zamijenjena ugibomjerima. Nakon toga, deformacije su praćene tokom cijelog perioda trajanja opterećenja, što je u ovom slučaju bilo 250 dana.



Slika 2. Izgled ispitivanih uzoraka

a) na kratkotrajno opterećenje

b) na dugotrajno opterećenje

Zaključci autora nakon sprovedenog istraživanja su sljedeći:

*Korišćenjem odredbi Pravilnika ACI 440.1R-06 i CSA-S806-02, dobijene vrijednosti ukupnih deformacija su precijenjene u svim slučajevima.

*Međutim, korišćenjem odredbi Pravilnika CEB-FIB dolazi se do veoma dobrog poklapanja teorijskih vrijednosti sa eksperimentalnim rezultatima:

$$\delta_{\text{CEB-FIB}}/\delta_{\text{exp}} = 0.92 - 0.96$$

*Procenat porasta ukupne vremenske deformacije nakon 10 dana je 65%, a nakon 90 dana 90%.

*Odnos ukupne i trenutne deformacije iznosi: 1.4 (za grede armirane sa 2Ø12 GFRP šipke), odnosno 1.5 (za grede armirane sa 2Ø16 GFRP i 2Ø10 čelične šipke)

U radu [5] ispitivane su 4 grede dimenzija 152x305x3048 mm, armirane sa po 2 GFRP šipke, prečnika Ø13 mm. Korišćene su staklene uzengije, prečnika Ø10 mm.

Dugotrajno opterećenje je nanošeno u dva različita nivoa. Deformacije su praćene tokom cijelog perioda trajanja opterećenja, što je u ovom slučaju bilo 847 dana.

Zaključci autora nakon sprovedenog istraživanja su sljedeći:

* Koeficijent tečenja kod greda armiranih sa GFRP šipkama je niži nego kod greda armiranih čelikom, zato što su im trenutne deformacije veće.

* Efekti tečenja su bili značajni do 175-tog dana, kod uzoraka ispitivanih pod većim nivoom opterećenja (50% od graničnog), kod kojih je utvrđen i veći koeficijent tečenja nego kod uzoraka ispitivanih pod nižim nivoom opterećenja (20 % od graničnog), kod kojih su efekti tečenja bili značajni do 75-tog dana.

* Prema Pravilniku ACI 318-95, predložen je korekcionni koeficijent od 0.75, kao vremenski zavistan faktor, u cilju procjene dugotrajnih deformacija usljed tečenja.

3. ZAKLJUČAK

Ranija istraživanja na ispitivanju reoloških svojstava betonskih uzoraka armiranih kompozitnim armaturama, u uslovima ubrzanog starenja (accelerated tests), ne daju dobre rezultate u poređenju sa istraživanjima u prirodnim uslovima starenja, pa stoga, pri reološkom modeliranju, nije moguće preuzeti materijalne parametre, kojim se kvantifikuje njihovo naponsko-deformacijsko ponašanje. Pregledom literature je zaključeno da je tečenje usljed prirodnog starenja materijala znatno manje istraženo, vjerovatno usljed neposjedovanja odgovarajućih laboratorija za tu namjenu.

Analizom određenog broja rezultata dosadašnjih naučnih istraživanja iz predmetne oblasti, došlo se do sljedećih saznanja:

- Korišćenjem odredbi Pravilnika ACI i CSA, dobijene vrijednosti vremenskih deformacija, kao i koeficijenata tečenja, su, u većini slučajeva, precijenjene, dok se, korišćenjem odredbi Pravilnika CEB-FIB, dolazi do veoma dobrog poklapanja teorijskih vrijednosti sa eksperimentalnim rezultatima.
- Deformacije tečenja, kao i trenutne deformacije, dostižu mnogo veće vrijednosti kod greda armiranih staklenom armaturom (GFRP RC), nego kod greda armiranih čelikom (SRC). Shodno tome, koeficijent tečenja ima približno istu vrijednost, kod oba tipa greda, dok u određenim slučajevima dostiže i 50% nižu vrijednost kod GFRP RC greda, nego kod SRC greda.

Na osnovu navedenog, može se izvesti sljedeći zaključak:

Preporučuje se šira upotreba FRP armature u betonskim elementima pod dugotrajnim opterećenjem, jer se, bez obzira na njeno krto ponašanje do loma, oni ponašaju duktilnije, u poređenju sa istim elementima koji su armirani čelikom.

Pri tom je veoma važno voditi računa o pravilnom projektovanju i proračunu ispitivanih elemenata, a takođe je potrebno zaći dublje u ovo područje istraživanja.

Potražnja konstruktora govori u prilog neophodnosti novih i širih istraživanja, koja bi rezultirala donošenjem relevantnog Pravilnika.

Veoma mali broj ovog tipa istraživanja, uz izraženu potražnju među konstrukterima za primjenljivim rezultatima, čini ih neophodnim za širu primjenu FRP šipki kao unutrašnje armature.

4. SMJERNICE ZA BUDUĆA ISTRAŽIVANJA

Utvrđeno je da je najveći broj istraživanja sproveden za elemente armirane staklenim kompozitnim armaturama (GFRP), s obzirom da je riječ o uzorcima sa najnižom cijenom koštanja. Shodno tome, buduća istraživanja bi se, u cilju uporedne analize sa rezultatima dobijenim u ranijim istraživanjima, osim staklenim armaturama, trebala baviti upotrebom karbonske kompozitne armature (CFRP), koja, u odnosu na ostale tipove, ima i najbolje mehaničke karakteristike.

Postojeći propisi za projektovanje konstrukcija armiranih kompozitnim armaturama ne daju dobra poklapanja sa eksperimentalno dobijenim rezultatima, pa se očekuje obezbjeđenje pouzdanih pravila, koja bi se implementirala u propise Time bi se u

budućnosti stvorila osnova za poboljšanje samog materijala i omogućila šira primjena FRP šipki kao unutrašnje armature.

U tu svrhu bi bilo neophodno intenzivirati rad na eksperimentalnoj analizi vremenskog ponašanja ovih elemenata, i to u uslovima prirodnog starenja materijala.

LITERATURA

- [1] Arockiasamy, M., Chidambaram, S., Amer, A., and Shahawy, M.: „Time-Dependent Deformations of Concrete Beams Reinforced with CFRP Bars“, Composites, Part B, Engineering, Oxford, UK, V. 31, pp. 577-592, 2000
- [2] Darabi, M.: „Long-term deflections of one-way concrete slab strips containing steel and GFRP reinforcement“, master thesis, 2011
- [3] Hall, T., and Ghali, A.: „Long-Term Deflection Prediction of Concrete Members Reinforced with Glass Fiber Reinforced Polymer Bars“, Canadian Journal of Civil Engineering, V. 27, pp. 890-898, 2000
- [4] Mias i Oller C.: „Analysis of time-dependant flexural behavior of concrete members reinforced with fibre reinforced polymer bar“, doctoral thesis, 2012
- [5] Vijay P.V.: „Aging and design of concrete members reinforced with GFRP bars“, doctoral thesis, 1999

Министарство за просторно уређење, грађевинарство
и екологију Владе Републике Српске
Привредна комора Републике Српске
Архитектонско-грађевински факултет, Бања Лука
Јавна установа институт за испитивање материјала
и конструкција Републике Српске
Завод за изградњу а.д. Бања Лука

XI Међународни научно-стручни скуп
САВРЕМЕНА ТЕОРИЈА И ПРАКСА
У ГРАДИТЕЛСТВУ
Бања Лука, 14. и 15. мај 2015.



Ministry of Spatial Planning, Civil Engineering
and Ecology of the Government of the Republic of Srpska
Chambre of Commerce and Industry of the Republic of Srpska
Faculty of Architecture and Civil Engineering, Banja Luka
The Public Institution Institute for Materials
and Construction Testing of Republic of Srpska
Institut for Construction Banja Luka

11th International Scientific Technical Conference
CONTEMPORARY THEORY AND PRACTICE
IN BUILDING DEVELOPMENT
Banja Luka, may 14th and 15th 2015.

Радомир Зејак¹, Наташа Копитовић Вуковић²

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА АНАЛИЗА ПОНАШАЊА АБ ГРЕДА ОЈАЧАНИХ КОМПОЗИТНИМ МАТЕРИЈАЛИМА

Резиме:

У овом раду се дају основне поставке за експерименталну анализу доприноса спољашњег ојачања граничној носивости АБ греда стварних димензија. Презентирани су основни подаци о узорцима, апаратури за испитивање, начину ојачавања и другим релевантним параметрима. Овим истраживањем се очекује потврда утицаја спољашњег CFRP ојачања на значајно повећање чврстоће на савијање, смањење угиба и деформација и редукцију ширине прелина. Такође се разматра и утицај ојачања на промјену механизма лома ових елемената под оптерећењем.

Кључне ријечи: CFRP, АБ греде, савијање, експеримент

BEHAVIOR OF RC BEAMS STRENGTHENED WITH COMPOSITE MATERIALS - EXPERIMENTAL ANALYSIS

Summary:

This paper presents the basic settings for the experimental analysis, with aim to determine contribution of external CFRP strengthening to bearing capacity of RC beams with actual dimensions. Basic information about the samples, testing equipment, method of strengthening and other relevant parameters are presented. Confirmation of the influence of external CFRP reinforcements in a significant increase in flexural strength, reduction of deflection, deformation and crack widths is expected, and also its impact on change in fracture mechanisms of these elements under load.

Keywords : CFRP, concrete beams, flexural behavior, experiment

¹ др. редовни професор, Грађевински факултет Универзитета Црне Горе, rzejak@t-com.me

² мр. стручни сарадник, Грађевински факултет Универзитета Црне Горе, nataly@ac.me

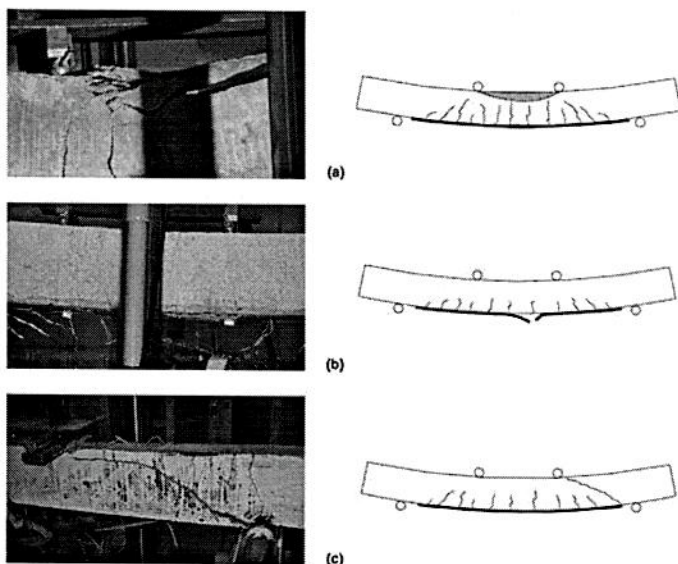
1. УВОД

Корозија, замор и недостатак правилног одржавања су, углавном, главни узрочници пропадања конструкција.

Могућности брзог наношења FRP (fiber reinforced plastics) ојачања, нарочито карбонских, уз минимално ометање у раду конструкције, и без видљивих измјена у тежини или геометрији ојачаног елемента, као и његова велика затезна чврстоћа и модул еластичности, чини овај материјал атрактивним и практичним за ојачање постојећих елемената. Успјешност ове методе зависи првенствено од квалитета и исправности везе композитни материјал - бетон, као и од ефикасности употријебљене прионљиве материје. Уколико дође до попуштања ове везе, губе се све конструктивне предности употребе FRP композита. Зато треба имати у виду да карактеристике ове везе одређују понашање ојачаних бетонских пресека.

Бројна експериментална и теоријска испитивања су показала да спољашња CFRP ојачања затегнуте стране бетонских греда значајно повећавају чврстоћу на савијање, смањују угибе и редукују ширину прелина. Такође утичу на промјену понашања ових елемената под оптерећењем, односно мијењају им механизам лома.

У идеалном случају до лома FRP ојачаних АБ греда би дошло ломом притиснутог бетона или пуцањем FRP траке. У стварности се лом најчешће дешава услед одвајања FRP ојачања од бетонске подлоге, па се не може искористити пуни капацитет носивости овог система ојачања (сл. 1).



Слика 1 - Механизми лома типа I: (a) лом притиснутог бетона; (b) лом FRP траке; (c) лом услед смицања

2. ПРЕДМЕТ И ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА

Прегледом литературе утврђено је да се највећи број радова на испитивању понашања ојачаних бетонских греда односи на испитивања на моделима, тј. узорцима малих димензија. Имајући у виду принципе моделирања, понашање испитиваних узорака није могуће преузети као репрезентативно.

Због тога је предмет сопственог истраживања, у ужем смислу, управо понашање гредних носача стварних димензија, ојачаних FRP материјалом.

Циљ истраживања, које ће се спровести у оквиру докторске дисертације, је да се, кроз експериментално и теоријско истраживање, утврди допринос FRP материјала повећању носивости ојачаних конструкција, под утицајем краткотрајног оптерећења.

Резултати испитивања ојачаних узорака треба да дају потврду закључака претходних испитивања, која су указала на то да спољашње ојачање повећава граничну носивост греде, смањује угибе, а такође смањује и ширину прслина и редукује њихово ширење.

3. ПРОГРАМ ИСТРАЖИВАЊА

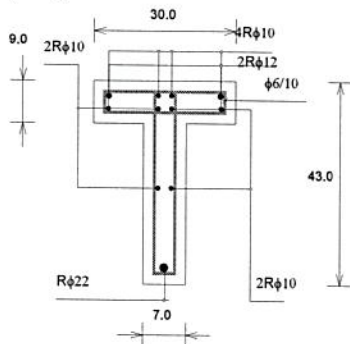
Рад на предметном истраживању обухватиће:

- Анализу досадашњих истраживања из научне области;
- Формирање програма сопствених теоријских и експерименталних истраживања;
- Обраду и анализу резултата сопствених експерименталних истраживања, као и упоредну анализу са досадашњим истраживањима других аутора;
- Моделовање експериментално тестираних узорака примјеном методе коначних елемената и упоредна анализа експерименталних и нумеричких резултата.

Централно мјесто у програму истраживања заузима сопствена експериментална анализа, па ће зато бити формулисан прецизан план и програм тог истраживања, а на основу претходних истраживања и резултата, искустава и закључака других аутора, као и сопствених.

3.1. ПЛАН ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОГ ИСТРАЖИВАЊА

У плану је испитивање чврстоће на савијање 9 армиранобетонских узорака система просте греде, распона 7.8 м (сл.2).



Слика 2 - Попречни пресјек испитиваних узорака

Експериментално истраживање ће се спроводити у лабораторији Грађевинског факултета у Подгорици, коришћењем постојеће опреме, уз неопходне модификације.

Раније је извршено испитивање два пробна узорка.

Лом првог, контролног, неојачаног узорка наступио је услед савијања, при сили од 35kN.

Установљено је да елементи не посједују довољну количину арматуре за прихватање додатних утицаја, и да их треба ојачати. Рјешење је дато у виду ојачања карбонским тракама за прихватање момента савијања, на доњој затегнутој страни пресјека. На овај начин се избјегава уграђивање додатне неопходно потребне арматуре, која изискује везу између старе и нове арматуре, у виду обијања бетона и анкеровања нове арматуре, као и повећање висине пресјека. Карбонске траке практично не повећавају висину пресјека, а на веома ефикасан начин повећавају његову носивост.

У даљем плану је испитивање на краткотрајно оптерећење свих узорака, до појаве прве прслине, а затим ојачавање затегнуте зоне карбонским тракама. На овај начин се симулира стварно стање у елементима којима треба ојачање.

3.1.1. ШЕМЕ ОЈАЧАВАЊА УЗОРАКА

У току предметног испитивања, вариране би се шеме ојачавања, како би утврдили утицај овог параметра на механизам лома и носивост предметних узорака.

Први систем ојачања је већ примијењен на другом пробном узорку, од стране наведене фирме. На претходно очишћену и изглачану површину, нанијет је слој за изравнавање, производ фирме „Синтек“ из Скопља. Овај материјал је, уствари, трокомпонентни епоксидни малтер, намијењен за припрему и нивелисање бетонских и армиранобетонских подлога, прије ојачавања карбонским тракама.

На овај слој је нанијет слој лијепка, такође производ фирме „Синтек“. То је двокомпонентни материјал на бази полимер цемента, који има улогу да обезбиједи добро пријањање карбонске траке за бетон.

Карбонска трака, ширине 50 мм и дебљине 1.2 мм, залијепљена је на ребро Т-пресјека, са доње стране, и то на дужини од 4 м, тј. у средишњем распону, гдје је концентрација највећих напона и гдје су се јавиле највеће прслине при испитивању на краткотрајно оптерећење.

Планирано је повећање дужине траке са 4 на 6 метара, како би утврдили утицај овог параметра на понашање греде и на њену носивост.

3.2. АПАРАТУРА ЗА ИСПИТИВАЊЕ

На слици 3 је приказан начин наношења краткотрајног оптерећења. Узорак је постављен на бетонске ослонце, на распону од 7400 мм. Оптерећење је наношено као концентрисано, у инкрементима од по 10 kN, преко пресе, носивости 80 kN. Брзина наношења оптерећења износила је 60 мин по фази-инкременту, при чему су се мјерења вршила око 15 минута након наношења оптерећења, због стабилизације процеса.

3.2.1. МЈЕРНА ТЕХНИКА

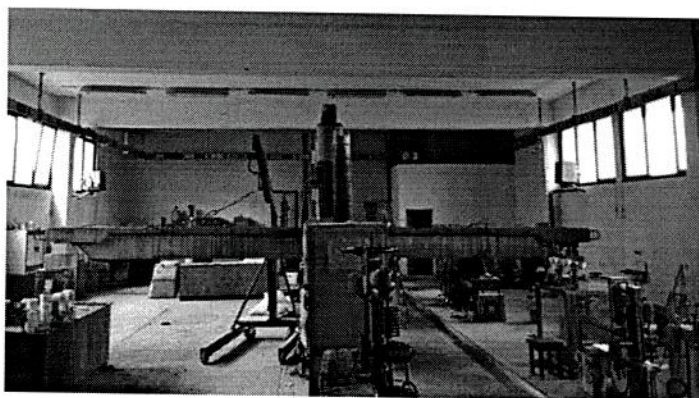
Три угибомјера, осјетљивости 1/1000 мм, коришћена су за мјерење угиба, постављени један у средину распона, а остали на ≈250 цм од ослонаца.

Мјерење дилатација у бетону и подужној арматури обављено је механичким деформетром типа „Пфендер“, прецизности 1/1000 мм и са базом мјерења од 100 мм. За мјерење деформација на бетону направљена је шема мјерних мјеста, на међусобном растојању од 100 мм, и то на притиснути дио плоче, као и на затегнуту страну ребра. Исти распоред мјерних мјеста је усвојен и на другој страни греде, симетрично. Као мјеродавни су усвојени просјечни резултати мјерења са двије стране греде.

Обртање ослонаца је мјерено клинометром.

За праћење појаве и развоја прслина коришћена је лупа, са тачношћу од 0.025 цм. Њихова мапа је прописно изведена, за сваки инкремент, почевши од тренутка настанка прве прслине па све до лома.

У погледу мјерне технике, осим већ наведеног, мјерене су и деформације карбонских трака, а у ту сврху су коришћене мјерне траке, произвођача TML из Јапана.



Слика 3 - Контролна греда спремна за испитивање на краткотрајно оптерећење

4. РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА ПРОБНИХ УЗОРАКА

Гранична носивост греде

У погледу граничне носивости греде, утврђено је повећање од 91%, у односу на неојачану греду. Наступио је лом уз пуно искоришћење капацитета карбонске траке.

Мјерење величине угиба

Мјерени су угиби у средини и трећинама греде. Средишњи угиби су, као што се и очекивало, највећи.

Пробна, неојачана греда је доживјела мах средишњи угиб од 7.96 цм при сили лома од 35 kN, док је ојачана греда, при истој сили, доживјела угиб од 2.1 цм. Ова греда је највећи угиб доживјела при сили лома од 65 kN и износио је 6.8 цм.

Мјерење дилатација у бетону

Неојачана греда је, при сили лома од 35 kN, доживјела деформације на затегнутој ивици бетона од 20.46‰, а на притиснутој од 6.79‰.

Ојачана греда је, при сили од 35 кN, доживјела деформације на затегнутој ивици бетона од 5.28%, а на притиснутој од 7.29%.

При сили лома од 65 кN, ојачана греда се на затегнутој ивици бетона потпуно растеретила, па су деформације износиле 0.34%, док су на притиснутој ивици деформације достигле вриједност од 7.59%.

Мјерење деформација карбонске траке

У средини траке се јављају највеће деформације. На крајевима траке деформације су занемарљиве.

Мјерење величине прслина

Праћењем развоја прслина, потврђен је закључак претходних испитивања да спољашње ојачање врши значајну редукцију ширине прслина.

Наиме, код контролне греде је измјерена највећа ширина прслине од 3 мм, при сили лома од 35 кN, док су се код ојачане греде прве прслине појавиле тек при сили од 40 кN.

Максимална ширина прслина код ојачане греде, регистрована при сили од 60 кN износила је 0.8 мм.

5. ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА

Аутори претходних истраживања су дошли до закључака да примјена FRP система спољашњег ојачања АБ греде доводи до повећања њене чврстоће на савијање у износу од 10 до 160%. Повећање носивости је уједно доводило до пада дуктилности, и то и до 70% у односу на контролну греду.

Након спроведеног сопственог испитивања пробних узорака, могуће је донијети следеће закључке:

- Спољашње ојачање АБ греда довело је до повећања носивости у износу од 91% у односу на контролну, неојачану греду;
- Овај начин ојачања је значајно редуковао величину угиба, такође у поређењу са контролном, неојачаном гредом;
- Дошло је до промјене механизма лома ојачане греде;
- Као што се и очекивало, број прслина код ојачане греде је био већи, али је њихова ширина била знатно мања;
- С обзиром на величину измјерених деформација карбонске траке, нема назнака да ће доћи до њеног одвајања, као што се у већини ранијих експерименталних истраживања дешавало. Наиме, та истраживања су вршена на моделима, а не на узорцима реалних димензија, па су закључци донешени на основу њих непоуздани.

6. СМЈЕРНИЦЕ ЗА БУДУЋА ИСТРАЖИВАЊА

Након спроведеног сопственог експерименталног истраживања над осталим узорцима, као и обраде и анализе резултата, очекује се потврда закључака претходних истраживања, спровођењем упоредне анализе са досадашњим истраживањима других аутора:

- Утврђивање утицаја спољашњег ојачања на граничну носивост греде и њену дуктилност, као и на ширину прслина и њихово ширење;

- Утврђивање утицаја положаја ојачања на механизам лома, примјеном неколико шема ојачања.

Након моделовања експериментално тестираних узорака примјеном методе коначних елемената биће могућа провјера добијених резултата. Ова метода ће нам дати параметре неопходне за спровођење упоредне анализе са добијеним сопственим експерименталним подацима, као и са нумеричким анализама других аутора.

Понашање FRP ојачаних конструкција тек треба да се прикладно и прецизно моделира за многе случајеве. Мада, на основу свега наведеног, препоручује се ојачавање армиранобетонске конструкције танким производима од CFRP композита, због многих предности и доброг понашања, поготово у агресивној средини за челик.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures* // ACI 440.2R-08 - American Concrete Institute, Committee 440, 2008;
- [2] *Debonding of FRP in bending: Simplified model and experimental validation* / R.J. Casas, J. Pascual, 2007;
- [3] *Externally bonded FRP reinforcement for RC structures* // CEB-FIP, 2001;
- [4] *Experimental performances of RC beams strengthened with FRP materials* / F. Ceroni, 2010;
- [5] *Flexural strengthening of RC beams using externally bonded FRP sheets through flexible adhesive bonding* / J.G. Dai, T. Ueda, Y. Sato, T. Ito, 2005;
- [6] *Failure diagrams of FRP strengthened RC beams* / B. Gao, C.K.Y. Leung., J-K. Kim, 2007;
- [7] *Strengthening reinforced concrete beams using fiber reinforced polymer (FRP) laminates* / N.F. Grace, G.A. Sayed, A.K. Soliman, K.R.Saleh, 1999;
- [8] *Numerical analysis of RC beams flexurally strengthened by CFRP laminates* / A.R. Khaloo, A. Gharachorlou, 2005;
- [9] *Bond between FRP and concrete in reinforced concrete beams strengthened with near surface mounted and externally bonded reinforcement* / R. Kotynia, 2011;
- [10] *Prediction of failure Load of RC beams strengthened with FRP plate due to stress concentration at the plate end* / A.M. Malek, H. Saadatmanesh, M.R. Ehsani, 1998;
- [11] *Structural retrofitting of reinforced concrete beams using carbon fibre reinforced polymer* / Y.T. Obaidat, 2010;
- [12] *RC beams strengthened with GFRP plates* / H. Saadatmanesh, M.R. Ehsani, 1991;
- [13] *Rehabilitation of Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers* / A.S. Shamim, 2001;
- [14] *Strengthening of initially loaded reinforced concrete beams using FRP plates* / A. Sharif, G.J. Al-Sulaimani, I.A. Basunbul, M.H. Baluch, B.N. Ghaleb, 1994;

- [15] *Experimental and numerical study on behavior of externally bonded RC T-beams using GFRP composites* / T. Shit, 2011;
- [16] *FRP strengthened RC beams I* / S.T. Smith, J.G. Teng, 2002;
- [17] *Use of carbon fiber laminates for strengthening reinforced concrete beams in bending* / H.R. Sobuz, E. Ahmed, S. Hasan, A. Uddin, 2011;
- [18] *Failure Mode Analyses of Reinforced Concrete Beams Strengthened in Flexure with Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymers* / H. Thomsen, E. Spacone, S. Limkatanyu, G. Camata, 2004;
- [19] *Ојачавање армиранобетонских греда неметалним ламелама* / И. Томичић, 2001;
- [20] *The load-carrying capacity of reinforced concrete beams strengthened with carbon fibre composite in the tension zone subjected to temporary or sustained loading* / J. Valivonis, T. Skuturna, M. Daugevicius, 2010;
- [21] *Design recommendations for the strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded composite plates* / Y-C. Wang, K. Hsu, 2009;
- [22] *Plate end debonding in FRP-plated RC beams - I: Experiments* / J. Yao, J.G. Teng, 2007.



THE 7th INTERNATIONAL CONFERENCE
"CIVIL ENGINEERING - SCIENCE AND PRACTICE"
GNP 2020 – Kolašin, Montenegro, 10-14 March 2020

Nataša Kopitović-Vuković¹, Radomir Zejak², Marija Jevrić³, Nikola Baša⁴

RHEOLOGICAL MODEL OF FRP REINFORCED CONCRETE

Abstract

Rheological models represent a powerful tool for creating a comprehensive phenomenological view of the strain response, especially in structures exposed to long-term loading. Models are often arranged to fit experimental results, and this is achieved by including empirical parameters in their formation. Combining theoretically ideal bodies with well-defined rheological characteristics produces models that, in rheological terms, give results similar to the actual behaviour of the material. Although there are doubts that the superposition of the component elements strains of concrete rheological model, may lead to adequate prediction of its components behaviour, this approach is, for practical application, sufficiently accurate and acceptable.

In this paper, a rheological model of concrete reinforced with FRP composite reinforcement is presented and its rheological equation is derived. This model is a complex rheological model developed by parallel binding of complex Burger and basic Hooke model. Like other rheological models, this model shows strains in an alternative form, and is also useful in the visualization of flow effects, especially in the superposition of strains.

Influential parameters for the model with physical characteristics variable over time are analysed. In particular, the influence of the modulus of elasticity of the composite material was considered and it was concluded that the ultimate creep strain depends on this parameter, while the age at the time of loading, in this model, has no effect on it.

The actual time-dependant behavior of FRP reinforced concrete in real time interval can be well described by the given model.

Key words

Rheology, rheological modelling, concrete, creep, FRP reinforcement, rheological equation

¹ Mr, University of Montenegro, Faculty of Civil Engineering, nataly@ucg.ac.me

² Dr, University of Montenegro, Faculty of Civil Engineering, rzejak@t-com.me

³ Dr, University of Montenegro, Faculty of Civil Engineering, marijaj@ucg.ac.me

⁴ Dr, University of Montenegro, Faculty of Civil Engineering, nikola.basa@ac.me

1. INTRODUCTION TO RHEOLOGICAL MODELLING

Rheology is the science that studies the relations between materials stresses and strains as a function of time. On the one hand it relies primarily on the testing results of the mechanical properties of certain materials, and on the theoretical continuum mechanics settings and results on the other.

One of the important tasks of rheology is to describe the materials creep using appropriate mathematical models with as few variables as possible [1]. It starts with the simplest bodies, whose behaviour can be idealized by visualizing simple mathematical models, i.e. the model is given physical meaning. The most important step in fulfilling this task is finding analytical connection between the stress and strain tensor components. The purpose is entirely of practical nature, which means that the connections obtained are used to make conclusions about the materials and structures time-dependant behaviour. The actual behaviour of certain materials is sometimes very complicated, so the stress and strain relationships are more complex. These relationships are represented by differential equations. By their solving, strains are obtained as a function of stress and time (creep equations), or stresses as a function of strain and time (relaxation equations).

2. PRINCIPLES OF RHEOLOGICAL MODELLING

Rheological models show the role of strains in an alternative form. They are also useful in visualizing the creep effects, and especially in the superposition of strains.

Models are often arranged to fit experimental results, and this is achieved by including empirical parameters in their formation [2].

2.1. DEVELOPMENT OF RHEOLOGICAL CONCRETE MODELS

The classical continuum mechanics considered two types of materials - the elastic Hooke body and the ideal Newton fluid. More detailed studies have shown that there are almost always viscous or other inelastic phenomena in a group of solids, so the current rheology specifically considers such phenomena [2]. In addition to these two ideal bodies there is some other typical behaviour which cannot be considered under provided ones. Thus, along with the theory of elasticity and fluid mechanics, a theory of plasticity emerged, whose results are used by the theory of steel and concrete structures.

For the purpose of simulating the behaviour of rheological concrete strains, numerous imaginary rheological models have been formed. They consisted of several elements, each displaying the specific strain characteristics of the respective component of concrete. This approach is highly empirical and its success is based on the ability to match a particular strain component with the corresponding model element [3].

In some other attempts, a certain number of rheological elements were combined only to approximate the total strains of the observed samples, without considering their physical meaning. Later research represents a step forward in relation to this simple alignment and their significance

lies in facilitating the setting and solving of differential equations, which include stress, strain and time, as well as their derivation in time.

2.2. DISADVANTAGES OF RHEOLOGICAL MODELLING

Serious shortcomings of rheological models have been observed. Many models have the form and built-in constants, which correspond to a certain type of concrete under given conditions, but are generally not widely applicable. The above agrees with a number of criticisms regarding creep-related terms [4]. Serious practical objections have been also observed: a model that correctly simulates behaviour under long-term loading does not give a good response under short-term or dynamic action, and vice versa. In general, a major disadvantage of rheological modelling is the empirical approach in the simulation of real behaviour, which is thought not to be able to extrapolate to further knowledge and not leading to an essential understanding of the considered phenomena [5].

3. RHEOLOGICAL MODELS

3.1. BASIC RHEOLOGICAL MODELS

The characteristic properties of the basic ideal materials are shown by elementary mechanical models for the case of axial stress, with defining the relations between stresses and strains. The basic ideal materials are: ideally elastic, ideally plastic and viscous material, and thus three basic rheological models are distinguished:

- Hooke's body, which simulates an ideally elastic material, and thus in rheological models is represented symbolically in the form of an elastic spring, with stiffness E ;
- Saint Venant's model, which simulates the behaviour of an ideal rigid-plastic material;
- Newton's model, which simulates the behaviour of an ideal viscous material, is thus symbolically represented in rheological models by a piston that moves inside a fluid-filled cylinder.

Material behaviour under loading can't be described using only the three basic models. Multiple element rheological models are used to represent material behaviour for complex stress states [6]. There are two, three, and more basic models interconnected: Hooke - "H", Saint Venant - "St. V" and Newton - "N". The inclusion of more elements showing the behaviour of a material, leads to the need to determine a number of constants that describe the action of each element in the model. In this way, the reliability of the final results may be lost, for example in numerical calculation methods, and especially in finding analytical solutions. [2].

There are two ways of forming complex models:

- by parallel connecting of the basic models (lateral), when it is assumed that the strains are equal everywhere, while the total stress equals the sum of the component stresses;
- by interconnecting the basic models (one after the other), assuming that the stresses in all parts are equal, while the total strain is equal to the sum of the strains of the individual elements.

3.2. BASIC RHEOLOGICAL EQUATIONS

To form the basic rheological equations, the following physical quantities must be included in the account:

ε_{ij} - strain tensor; $\dot{\varepsilon}_{ij}$ - speed increase strain tensor;

σ_{ij} - stress tensor; $\dot{\sigma}_{ij}$ - speed increase stress tensor

For all four tensors, the spherical and deviator component of each tensor should be considered. If the spherical components are denoted by the same-name indices and the deviator components by the various-name indices, then the basic constitutive equations can be written [7]:

$$C_1 \cdot \dot{\varepsilon}_{kk} + C_2 \cdot \varepsilon_{kk} = C_3 \cdot \dot{\sigma}_{kk} + C_4 \cdot \sigma_{kk} \quad (1)$$

$$C_5 \cdot \dot{\varepsilon}_{ij}^D + C_6 \cdot \varepsilon_{ij}^D = C_7 \cdot \dot{\sigma}_{ij}^D + C_8 \cdot \sigma_{ij}^D \quad (2)$$

where it is assumed:

- the material is homogeneous and isotropic;
- the strains are infinitesimal (otherwise these connections would be more complex);
- the bonds between the materials are isotropic.

4. RHEOLOGICAL MODEL OF FRP REINFORCED CONCRETE

Figure 1 shows a schematic representation of the considered model:

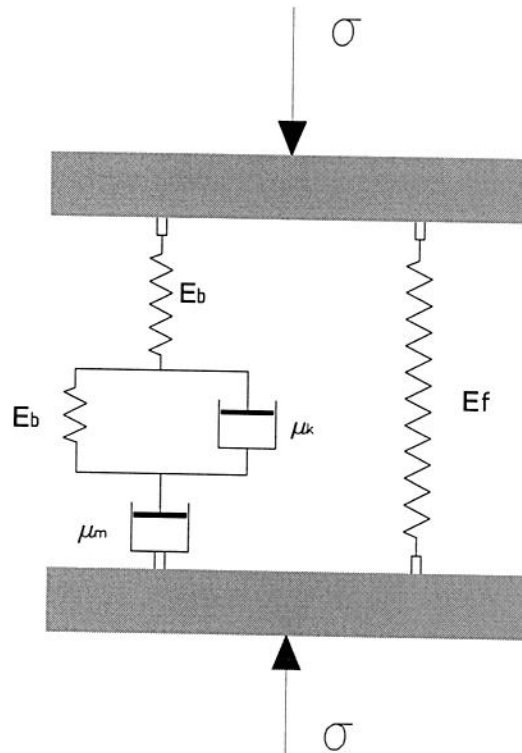


Figure 1. Model of FRP reinforced concrete

The rheological formula of a given model, expressed in symbols, is:

$$M^* = [(H \div N) \div (N // H)] // H = (M \div K) // H = B // H \quad (3)$$

This model is a complex rheological model created by the parallel connecting of the Burger and Hook models. The Burger model is also a complex rheological model, created by combining two basic models: Hook's ideally elastic model (H) and Newton's ideal viscous fluid (N) model. The interconnecting of these models (one after the other), gives the Maxwell model (M), and their parallel connection gives the so-called Kelvin Model (K).

4.1. THE RHEOLOGICAL EQUATION OF THE MODEL

The differential equation of model motion can be obtained by applying the symbolic method [7]. We introduce a symbol ∂ , which represents differentiation by time. We consider that all the elements in the model are elastic, while assuming that the coefficient of elasticity of the viscous element is the coefficient of viscosity multiplied by ∂ . In this way, we obtain the equivalent coefficient of elasticity for the parallel bonded elements E_b and μ_k :

$$E_b + \mu_k \cdot \partial = E'(\partial) \quad (4)$$

Interconnecting the elements E_b and μ_k one after the other with $E'(\partial)$ gives:

$$\frac{1}{E_b + \mu_k \cdot \partial} + \frac{1}{\mu_m \cdot \partial} + \frac{1}{E_b} = \frac{1}{E^*(\partial)} \quad (5)$$

Parallel connection with element E_f gives:

$$E^*(\partial) + E_f = E(\partial) = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (6)$$

When expression (5) is included in expression (6), one obtains:

$$E(\partial) = \frac{(E_f + E_b) \cdot \mu_k \cdot \mu_m \cdot \partial^2 + (E_b^2 \cdot \mu_m + 2E_f \cdot E_b \cdot \mu_m + E_f \cdot E_b \cdot \mu_k) \cdot \partial + E_f \cdot E_b^2}{\mu_k \cdot \mu_m \cdot \partial^2 + (2\mu_m + \mu_k) \cdot E_b \cdot \partial + E_b^2} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (7)$$

Otherwise shown as:

$$\begin{aligned} (E_f + E_b) \cdot \mu_k \cdot \mu_m \cdot \ddot{\varepsilon} + (E_b^2 \cdot \mu_m + 2E_f \cdot E_b \cdot \mu_m + E_f \cdot E_b \cdot \mu_k) \cdot \dot{\varepsilon} + E_f \cdot E_b^2 \cdot \varepsilon = \\ = \mu_k \cdot \mu_m \cdot \ddot{\sigma} + (2\mu_m + \mu_k) \cdot E_b \cdot \dot{\sigma} + E_b^2 \cdot \sigma \end{aligned} \quad (8)$$

Remarks:

With very slow action of long-term load, strain and stress speed rate tends to zero. At this limit state, the relative stiffness of the model is obtained by placing $\partial=0$ in equation (7): $E(0)=E_f$

At very high rates of model speed strain, by putting $\partial=\infty$ into equation (7), the following expression is obtained: $E(\infty)=E_f + E_b$. This value represents the maximum value of relative stiffness. Obviously, that is: $E(\infty) > E(0)$.

4.2. GENERAL INTEGRAL OF DIFFERENTIAL EQUATION OF THE MODEL

Since the physical characteristics of the model are time-dependant [8], the differential equation of motion takes the form:

$$\left(1 + \frac{E_f}{E_b}\right) \cdot \ddot{\varepsilon} + \left(\frac{E_f}{E_b \cdot \dot{\varphi}} + \frac{2E_f}{E_b \cdot \dot{\varphi}} + \frac{E_b}{E_b \cdot \dot{\varphi}}\right) \cdot \dot{\varepsilon} + \frac{E_f \cdot E_b}{E_b \cdot \dot{\varphi} \cdot E_b \cdot \dot{\varphi}} \cdot \varepsilon = \frac{1}{E_b} \cdot \ddot{\sigma} + \left(\frac{1}{E_b \cdot \dot{\varphi}} + \frac{2}{E_b \cdot \dot{\varphi}}\right) \cdot \dot{\sigma} + \frac{E_b}{E_b \cdot \dot{\varphi} \cdot E_b \cdot \dot{\varphi}} \cdot \sigma \quad (9)$$

Or, given that: $\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt}$

$$a_2 \cdot \frac{d^2\varepsilon}{d\varphi^2} + a_1 \cdot \frac{d\varepsilon}{d\varphi} + a_0 \cdot \varepsilon = b_2 \cdot \frac{d^2\sigma}{d\varphi^2} + b_1 \cdot \frac{d\sigma}{d\varphi} + b_0 \cdot \sigma \quad (10)$$

where the following applies:

$$a_0 = \frac{E_f}{E_b}; \quad a_1 = 3 \frac{E_f}{E_b} + 1; \quad a_2 = \frac{E_f}{E_b} + 1; \quad b_0 = \frac{1}{E_b}; \quad b_1 = \frac{3}{E_b}; \quad b_2 = \frac{1}{E_b}$$

When the right side of equation (10) is given, its general solution is in the form of [8]:

$$E \cdot \varepsilon(\varphi) = \sigma(\varphi) + \int_0^{\varphi} \sigma(\theta) \cdot K(\varphi - \theta) d\theta \quad (11)$$

wherein: $E = \frac{a_2}{b_2} = E_f + E_b$

$$K(\varphi - \theta) = \frac{(b_0 + \lambda_2 \cdot b_1 + \lambda_2^2 \cdot b_2) \cdot e^{\lambda_2(\varphi - \theta)} - (b_0 + \lambda_1 \cdot b_1 + \lambda_1^2 \cdot b_2) \cdot e^{\lambda_1(\varphi - \theta)}}{b_2 \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)}$$

where λ_1 and λ_2 are the root extraction of the characteristic equation: $a_2 \cdot \lambda^2 + a_1 \cdot \lambda + a_0 = 0$;

$$\lambda_{1/2} = -\frac{a_1}{2a_2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\frac{a_1^2}{a_2^2} - 4 \cdot \frac{a_0}{a_2}}$$

4.2.1. The case of constant stress

In this case where $\sigma = const$, the following is obtained:

$$\varepsilon(\varphi, \varphi_0) = \frac{\sigma_0}{E} \cdot \left[1 + \int_{\varphi_0}^{\varphi} K(\varphi - \theta) d\theta \right] = \frac{\sigma_0}{E} \cdot \left[1 + \int_0^{\varphi - \varphi_0} K(\psi) d\psi \right] \quad (12)$$

$$\varepsilon(\varphi, \varphi_0) = \frac{\sigma_0}{E} \cdot \left[1 + \frac{A_1}{\lambda_1} - \frac{A_2}{\lambda_2} + \frac{A_2}{\lambda_2} \cdot e^{\lambda_2(\varphi - \varphi_0)} - \frac{A_1}{\lambda_1} \cdot e^{\lambda_1(\varphi - \varphi_0)} \right] \quad (13)$$

where the following applies:

$$A_1 = \frac{b_0 + \lambda_2 b_1 + \lambda_2^2 b_2}{b_2 \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)}; \quad A_2 = \frac{b_0 + \lambda_1 b_1 + \lambda_1^2 b_2}{b_2 \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)}; \quad \varphi = \frac{c(t, \tau)}{\frac{1}{E_b}}$$

The ultimate values for the creep strains are obtained as:

$$\lim_{\varphi \rightarrow \varphi_0} \varepsilon(\varphi, \varphi_0) = \frac{\sigma_0}{E} = \frac{\sigma_0}{E_f + E_b}; \quad \lim_{\varphi \rightarrow \infty} \varepsilon(\varphi, \varphi_0) = \frac{\sigma_0}{E} \cdot \left(1 + \frac{A_1}{\lambda_1} - \frac{A_2}{\lambda_2} \right) = \frac{\sigma_0}{E_f} \quad (14)$$

4.2.2. The case of unloading

In this case where $\sigma = 0$, the equation (10) becomes:

$$a_2 \cdot \frac{d^2 \varepsilon}{d\varphi^2} + a_1 \cdot \frac{d\varepsilon}{d\varphi} + a_0 = 0 \quad (15)$$

The general solution of equation (15) is:

$$\varepsilon(\varphi) = c_1 \cdot e^{\lambda_1 \varphi} + c_2 \cdot e^{\lambda_2 \varphi} \quad (16)$$

The integration constants c_1 and c_2 are determined by the conditions:

$$- \quad t = t_I: \quad \varepsilon(\varphi_1) = \varepsilon(\varphi, \varphi_0) - \frac{\sigma_0}{E}; \quad \dot{\varepsilon}(\varphi) = \dot{\varepsilon}(\varphi, \varphi_0) \quad (17)$$

$$- \quad t > t_I (\varphi > \varphi_1): \quad \varepsilon(\varphi, \varphi_1) = \frac{A \cdot \lambda_2 - B}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot e^{\lambda_1(\varphi - \varphi_1)} - \frac{B - A \cdot \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot e^{\lambda_2(\varphi - \varphi_1)} \quad (18)$$

$$\lim_{\varphi \rightarrow \varphi_1} \varepsilon(\varphi, \varphi_1) = A = \frac{A_1}{\lambda_1} - \frac{A_2}{\lambda_2} + \frac{A_2}{\lambda_2} \cdot e^{\lambda_2(\varphi_1 - \varphi_0)} - \frac{A_1}{\lambda_1} \cdot e^{\lambda_1(\varphi_1 - \varphi_0)}; \quad \lim_{\varphi \rightarrow \infty} \varepsilon(\varphi, \varphi_1) = 0 \quad (19)$$

4.2.3. The case of constant strain

In this case where $\varepsilon = \text{const}$, the following is obtained:

$$\sigma(\varphi, \varphi_0) = E \cdot \varepsilon_0 \left[1 - \int_{\varphi_0}^{\varphi} R(\varphi - \theta) d\theta \right] = E \cdot \varepsilon_0 \left[1 - \int_0^{\varphi - \varphi_0} R(\psi) d\psi \right] \quad (20)$$

$$\sigma(\varphi, \varphi_0) = E \cdot \varepsilon_0 \cdot \left[1 - \frac{B_1}{\mu_1} + \frac{B_2}{\mu_2} - \frac{B_2}{\mu_2} \cdot e^{\mu_2(\varphi - \varphi_0)} + \frac{B_1}{\mu_1} \cdot e^{\mu_1(\varphi - \varphi_0)} \right] \quad (21)$$

wherein: $B_1 = \frac{a_2 \mu_2^2 + a_1 \mu_2 + a_0}{a_2 (\mu_2 - \mu_1)} \quad B_2 = \frac{a_2 \mu_1^2 + a_1 \mu_1 + a_0}{a_2 (\mu_2 - \mu_1)}$, to get:

$$\varphi = E_b \cdot c(t, \tau)$$

$$\lim_{\varphi \rightarrow \varphi_0} \sigma(\varphi, \varphi_0) = (E_f + E_b) \cdot \varepsilon_0; \quad \lim_{\varphi \rightarrow \infty} \sigma(\varphi, \varphi_0) = E \cdot \varepsilon_0 \cdot \left(1 - \frac{B_1}{\mu_1} + \frac{B_2}{\mu_2} \right) = E_f \cdot \varepsilon_0; \quad (22)$$

5. CONCLUSIONS

This paper presents a rheological model of the FRP reinforced concrete where its rheological equation is derived. Influential parameters for the model with physical characteristics variable over time are analyzed. The following conclusions were drawn:

- The creep coefficient φ is not precisely determined. Its value depends only on the constitution of the specific creep $c(t, \tau)$, as the change over time of concrete elasticity modulus has been neglected ($E_b = \text{const}$);
- The importance of the elasticity modulus of FRP material E_f is evident, because it will influence the ultimate creep strain;
- In this model the ultimate creep strain remains the same, regardless of the age at the time of loading and cannot exceed the value $\frac{\sigma_0}{E_f}$;
- The ultimate relaxation strain depends also of E_f and cannot exceed the value $\varepsilon_0 \cdot E_f$;
- With the careful construction of an analytical expression for the specific creep $c(t, \tau)$, based also on experimental research, the model presented can well describe the actual time-dependant behavior of FRP reinforced concrete in real time interval.

Rheological models are useful as a mathematical representation of material behavior under certain conditions. This approach is, for practical application, sufficiently accurate and acceptable. However, the fact that concrete creep and shrinkage are interrelated variables, i.e. the presence of shrinkage influences the change in creep strain, should be kept in mind. The exact value of the creep strain can be determined by subtracting the shrinkage strains of unloaded concrete from the known total strains of loaded concrete, under the same climatic conditions.

LITERATURE

- [1] M. Alagušić, F. Lavriv: "Eksperimentalno određivanje reoloških svojstava samozbijajućeg betona", 2010
- [2] L. Frgić, M. Hudec: "Mehanika kontinuuma i reologija", Sveučilište u Zagrebu, 2006
- [3] S.Y. Jung, N. Kim, D.K. Shin: "Viscoelastic behavior on composite beam using nonlinear creep model", Steel and Composite Structures, 2007, 355-376
- [4] M.A. Faruqi, S. Bhadra, D. Sun, J. Sai: "An improved creep and shrinkage based model for deflections of composite members reinforced with carbon fiber reinforced bars", ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2010, 74-78
- [5] A.M. Neville, W.H. Dilger, J.J. Brooks: "Creep of plain and structural concrete", Construction Press, New York, 1983
- [6] D. Pustačić, I. Cukor, I.: "Teorija plastičnosti i viskoelastičnosti", Sveučilište u Zagrebu, 2009
- [7] A.R. Ržančin: "Teorija puzanja materijala", 1974
- [8] N. Kopitović-Vuković: "Reološki model FRP kompozitnog materijala", Seminarski rad iz predmeta: "Reologija građevinskih materijala", doktorske studije Građevinskog fakulteta Univerziteta Crne Gore, 2014.