

primljen: 05.12.2024.

Izvorni naučni rad

korigovan: 26.12.2024.

prihvaćen: 27.12.2024.

UDK : 624.012.45.042.7

<https://doi.org/10.62683/NiP28.3>

EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE VEZA AB MONTAŽNE HALE U SEIZMIČKIM USLOVIMA

Biljana Mladenović¹, Dragan Zlatkov², Marina Mijalković³

Rezime: Mnogobrojna istraživanja ukazuju da se veliki broj veza štapova u čvorovima montažnih armiranobetonskih (AB) konstrukcija ne može svrstati ni u idealno zglobove ni u apsolutno krute, već u polukrute veze. Stoga, analizu konstrukcije u fazi projektovanja treba sprovesti uzimajući u obzir realnu krutost veza. Kako su ove veze veoma kompleksne, određivanje njihove realne krutosti moguće je jedino eksperimentalno, što poskupljuje projektovanje, ali opravdano je kada su u pitanju velike serije tipskih objekata ove vrste, s obzirom na mnoge njihove specifičnosti. U radu su prikazani rezultati eksperimentalnih ispitivanja veza montažne hale "Elektrotehna" u Nišu dobijeni na uzorcima u pravoj veličini pri dejstvu cikličnih opterećenja do loma. Rezultati pokazuju nelinearne karakteristike ponašanja veza, što je neophodno uzeti u obzir pri formiranju realnog matematičkog modela za dinamičku seizmičku analizu.

Ključne reči: armiranobetonska montažna konstrukcija, polukruta veza, eksperiment u pravoj veličini, seizmička analiza.

EXPERIMENTAL TESTING OF THE CONNECTIONS OF A PRECAST RC HALL IN SEISMIC CONDITIONS

Abstract: Numerous researches indicate that a large number of member connections in the nodes of precast structures cannot be classified as ideally hinged or absolutely rigid, but as semi-rigid connections. So, structural analysis should be performed taking into account the real rigidity of connections. As these connections are very complex, determining their real rigidity is only possible experimentally, which increases the cost of designing, but is justified when it comes to large series of structures of this type, given their many specificities. The paper presents the results of experimental tests of the connections of the precast hall "Elektrotehna" in Niš, obtained on full-size samples under cyclic loading to the failure, which show nonlinear characteristics of connection behaviour, that is necessary to implement in creating a realistic mathematical model for seismic dynamic analysis.

Key words: Reinforced concrete precast structure, Semi-rigid connections, Full scale test, Seismic analysis.

¹ Dr, dipl.inž.građ, docent, Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu, biljana.mladenovic@gaf.ni.ac.rs, ORCID 0000-0002-8942-8788

² Dr, dipl.inž.građ, vanredni profesor u penziji, Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu, dragan.zlatkov@gaf.ni.ac.rs, ORCID 0000-0002-3464-2816

³ Dr, dipl.inž.građ, redovni profesor u penziji, Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu, marina.mijalkovic@gaf.ni.ac.rs, ORCID 0000-0003-1346-5467

1 UVOD

Industrijalizacija pojedinih regiona u svetu usloвила je porast izgradnje industrijskih hala u seizmički aktivnim područjima, pri čemu su zbog poznatih prednosti najzastupljenije montažne konstrukcije, i to sve većih dimenzija. Zbog nedovoljnog poznavanja dinamičkog ponašanja takvih objekata pri dejstvu jakih zemljotresa, izuzetno je visok i nedovoljno kontrolisan seizmički rizik.

U mnogim slučajevima pri dejstvu jakih zemljotresa u prošlosti nastala su teška oštećenja ili



Slika 1 – Karakteristični primeri oštećenja i rušenja za vreme zemljotresa u severnoj Italiji 2012. (<https://www.republicain-lorrain.fr/fil-info/2012/05/29/italie-un-nouveau-seisme-dans-le-nord-est-fait-au-moins-dix-morts>)

Među najosetljivijim delovima montažnih industrijskih hala su konstruktivne veze. Skoro u svim slučajevima jakih zemljotresa došlo je do oštećenja ili loma konstruktivnih veza, a usled ovih strogo lokalnih pojava i do značajnih oštećenja ili potpunog rušenja objekata. Mnogobrojna istraživanja zasnovana na eksperimentalnim rezultatima i numeričkim simulacijama ukazuju na to da se veliki broj veza štapova u čvorovima montažnih konstrukcija ne može svrstati ni u idealno zglobne ni u apsolutno krute, već u polukrute veze, što je neophodno uzeti u obzir pri analizi ovakvih konstrukcija.

U radovima [7] i [8] dokazano je da stepen ukleštenja konstruktivnih elemenata u čvorovima igra značajnu ulogu u ponašanju AB montažnog objekta za vreme zemljotresa, ali se ne razmatra kako odrediti stepen ukleštenja na mestu polukrute veze, dok se u [9] daje predlog za proračun jednog tipa polukrute veze. Rezultati naših ranijih istraživanja su pokazali da ponašanje veza mora biti uzeto u proračun prilikom najranije faze projektovanja konstrukcije, jer i mali stepen ukleštenja na mestima montažnih veza utiče na

rušenja montažnih AB industrijskih hala, slika 1. Ovo se dešavalo i u najrazvijenijim zemljama sveta, gde se posvećuje posebna pažnja razvoju zemljotresnog inženjerstva i unapređenju propisa za građenje seizmički otpornih objekata, kao što su Amerika [1], Japan [2], Kina [3], Turska [4], [5], Italija [6]. Dolazilo je i do totalnog uništavanja mašina i opreme, koja je često mnogo skuplja od same konstrukcije objekta. Ojačanje oštećenih objekata je takođe veoma skup i težak proces i može izazvati zaustavljanje proizvodnje izazivajući dugoročne ekonomske posledice.



osnovna dinamička svojstva konstrukcije, pa samim tim i na njen seizmički odgovor [10].

Imajući sve gore navedeno u vidu, evidentno je da postoji potreba istraživanja realnih seizmičkih performansi veza montažnih AB industrijskih hala sa ciljem formulisanja poboljšanih inovativnih rešenja, koja ne izazivaju značajno poskupljenje objekta, a doprinose višestrukom smanjenju seizmičkog rizika.

U radu su prikazani rezultati eksperimentalnih ispitivanja veza prototipa postojeće montažne AB hale u Nišu dobijeni na uzorcima u pravoj veličini do stadijuma loma. Na osnovu analize rezultata dat je predlog za unapređenje pojedinih veza radi poboljšanja seizmičke otpornosti ove vrste objekata. Eksperimentalno određene karakteristike veza elemenata noseće konstrukcije će biti korišćene u našem daljem istraživanju za formiranje realnog nelinearnog matematičkog modela za dinamičku seizmičku analizu ove tipske montažne AB industrijske hale.

2 O SEIZMIČKOJ ANALIZI AB MONTAŽNIH INDUSTRIJSKIH HALA

Konstruktivni sistemi industrijskih hala se razlikuju od konstrukcija zgrada jer su spratne visine znatno veće nego spratne visine zgrada (od 5 m do 15 m), dok su rasponi glavnih krovnih nosača veliki i iznose do 30 m, a rasponi greda međuspratnih konstrukcija su od 10 m do 15 m, pa i više. Zbog velikih dimenzija industrijskih hala, skoro svi montažni elementi su velikih dimenzija i težina. Neke hale, posebno dvospratne i višespratne, mogu biti namenjene i za velika korisna opterećenja, tako da u slučaju zemljotresa zbog velike mase mogu biti generisane seizmičke sile znatnog intenziteta, što može izazvati oštećenje ili totalno rušenje objekata.

U praksi se pokazalo da je dolazilo do oštećenja i otkazivanja veza iz sledećih razloga:

- Intenzitet seizmičkih sila često je bio potcenjen, a kako su dinamičke sile imale ekstremne vrednosti koje nisu uzete u obzir, dolazilo je do loma;
- Konstruktivne veze su bile projektovane za dejstvo statičkih sila, jer se seizmičke sile često sračunavaju po modelu ekvivalentnog statičkog opterećenja, što nije realno u dinamičkim uslovima;
- Konstruktivne veze najčešće nisu eksperimentalno verifikovane za dejstvo cikličnih uticaja koje podrazumevaju seizmička dejstva. Međutim, naročito dvoznačnost dejstva može izazivati rušenje konstruktivnih veza ako nisu projektovane za takve uticaje.

Seizmička dejstva imaju karakter slučajnih i kratkotrajnih dejstava i mogu se, ali i ne moraju, javiti za vreme uobičajenog veka trajanja objekta. Ukoliko bi konstrukcija bila projektovana tako da i za najjača predviđena zemljotresna dejstva ostane u linearnom području rada materijala, to bi bilo neracionalno kako u ekonomskom, tako i u estetskom i funkcionalnom pogledu. To je neprihvatljivo i u konstruktivnom pogledu, jer se kod krutih konstrukcija može javiti kruti lom, što je nepovoljno sa aspekta željenog seizmičkog odgovora. Prihvatljivo je da se i pri umereno jakim seizmičkim dejstvima naprezanja konstruktivnih elemenata približe njihovoj graničnoj nosivosti, a kod nekih elemenata ona može biti i dostignuta. To znači da se očekuje da će odgovor nekih elemenata konstrukcije sigurno biti nelinearan, što podrazumeva da se na nekim konstruktivnim elementima mogu

pojaviti i izvesna oštećenja, pa je neophodno sprovesti nelinearnu analizu konstrukcije.

Za praktične primene nelinearna analiza se još uvek razvija, a ima mnogo područja gde su detalji primene otvoreni za prosuđivanje i alternativna tumačenja [11].

3 STUDIJA SLUČAJA – OBJEKAT "ELEKTROTEHNA" U NIŠU

Za istraživanje seizmičkog ponašanja AB montažnih industrijskih hala sa polukrutim vezama korišćen je objekat izveden u sistemu AMONT, Krušce, za potrebe "Elektrotehne" u Nišu, slika 2 [12].



Slika 2 – Objekat stovarišta u Nišu [www.portal-srbija.com/elektrotehna-nis]

Hala je projektovana kao prostorna dvospratna okvirna konstrukcija, a namenjena je za skladiranje elektromaterijala i bele tehnike. Objekat je izgrađen osamdesetih godina prošlog veka. Projektovan je prema propisima [15] za VIII seizmičku zonu prema MCS skali, što približno može odgovarati pik akceleraciji od $PGA = 0,20$ g, ali pri tome nisu vršene direktne dinamičke analize. Izvršene su jedino standardne statičke analize dejstva definisanih seizmičkih sila za poprečni i podužni pravac objekta. Veze stubova u temeljnim čašicama su usvojene kao idealno krute, dok su sve ostale veze u proračunu tretirane kao zglobove.

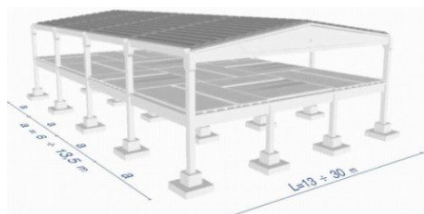
Konstruktivni elementi su na krajevima redukovanih dimenzija sa specifičnim konstruktivnim detaljima koji su namenski projektovani za ostvarenje konkretnih veza elemenata sistema, što povećava kompleksnost proračuna karakteristika, kako elemenata, tako i veza. Konstruktivne veze imaju specifično nelinearno ponašanje i zbog primene različitih tehnoloških rešenja, što je teško računski opisati. Na primer, karakteristike veze "zalivanjem" na licu mesta jedino se mogu eksperimentalno odrediti. Smanjenje modela za ovakva istraživanja se ne preporučuje s obzirom da principi modelske sličnosti u armiranom betonu prestaju da važe, jer su

Eksperimentalno ispitivanje veza AB montažne hale

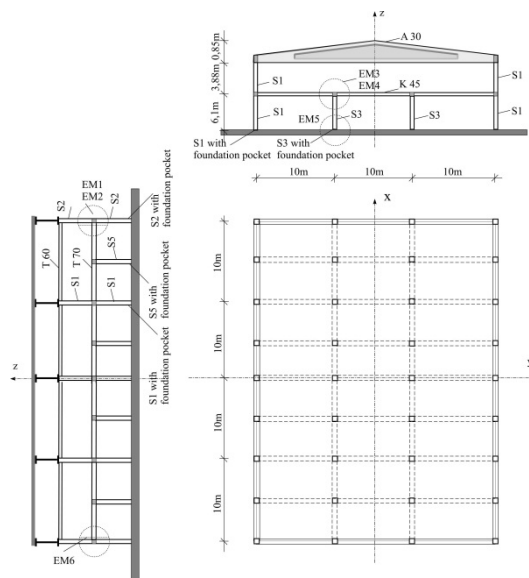
geometrijski odnosi veličine najkrupnije frakcije agregata, zaštitnog sloja, razmaka uzengija i utegnuto delu betonskog preseka značajno promenjeni u odnosu na uzorak u realnoj veličini.

Zbog svega navedenog, sa ciljem određivanja realnih karakteristika veza za formulaciju pouzdanih analitičkih modela za potrebe definisanja nelinearnog matematičkog modela konstrukcije izvršena su eksperimentalna ispitivanja uzoraka veza u pravoj veličini do loma.

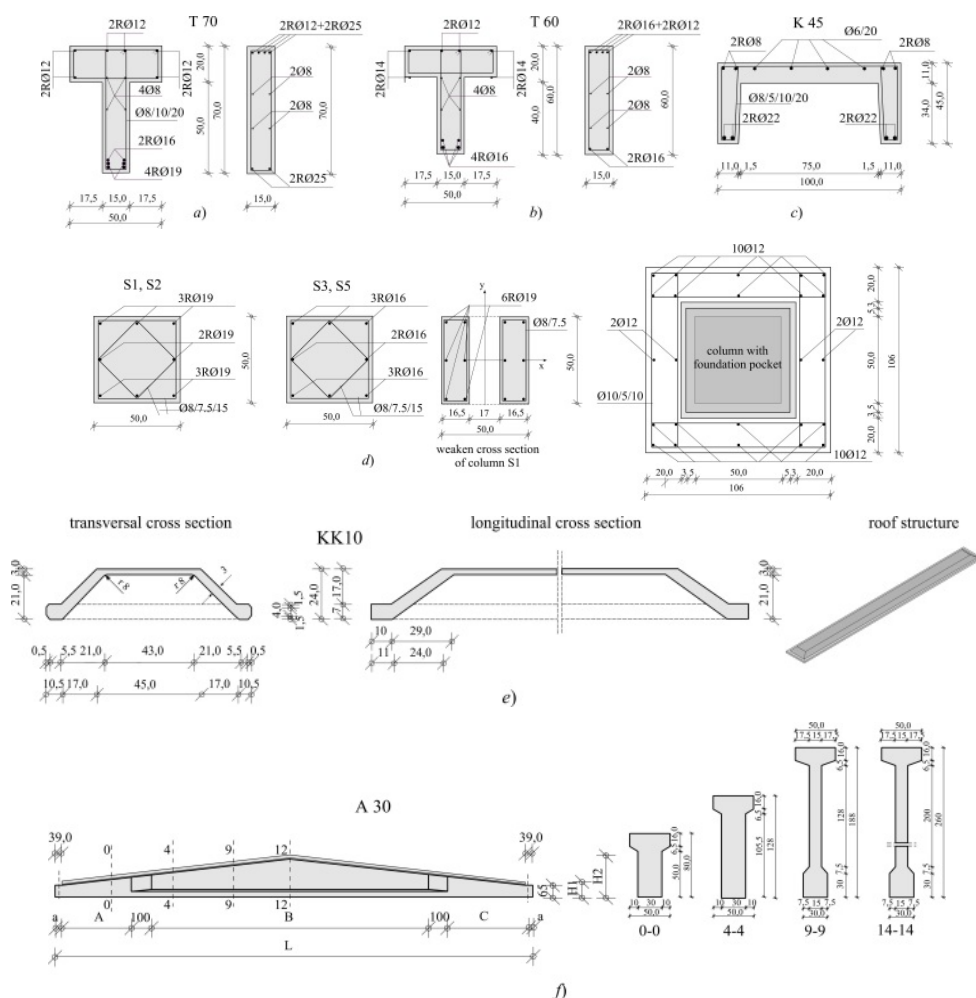
3.1 OPIS KONSTRUKCIJE



Slika 3 – Konstruktivni sistem objekta



Slika 4 – Osnova prizemlja, podužni i poprečni presek konstrukcije hale sa oznakama montažnih elemenata i veza koje su ispitivane



Slika 5 – Elementi montažne industrijske hale: a),b) grede međuspratne konstrukcije, c) međuspratna koritnica K 45, d) stubovi i stub sa temeljnom čašicom, e) krovn koritnica, f) krovn greda

Konstruktivni sistem objekta, slika 3, čija je osnova prikazana na slici 4, čine montažni prefabrikovani konstruktivni elementi prikazani na slici 5.

Glavni nosač A-30 je adhezivno prethodno napregnut element raspona 30 m I porečnog preseka i promenljive visine, od betona C40. Na mestu oslanjanja postupno prelazi u oblik T preseka visine 80 cm, dok u sredini raspona njegova visina iznosi 260 cm. Pored kablovske armature od 7 redova po 7 kablova, $7\phi 3$, koja je raspoređena u donjoj zoni nosača, armiran je i nekonstruktivnom armaturom $6R\phi 16$ u flanši nosača, $4R\phi 16$ u donjoj flanši nosača i $22R\phi 16$ po visini rebra.

Element K45 je od betona C40. Svi ostali elementi su od betona C30, armirani kao na slici 5.

Objekat je u celosti fundiran na temeljima samcima. Obodni parapetni zidovi su izvedeni na temeljnim gredama koje su projektovane za tu namenu. Objekt je na fasadi zatvoren montažnim fasadnim rebrastim elementima.

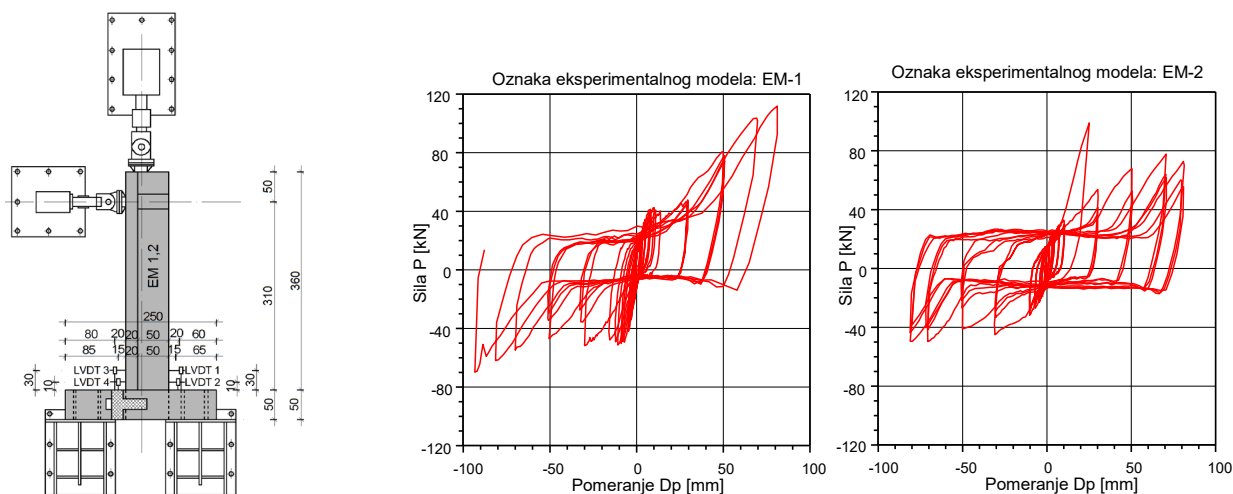
3.2 EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE MODELA VEZA U PRAVOJ VELIČINI DO LOMA

Eksperimentalno ispitivanje veza je realizovano u Institutu za zemljotresno inženjerstvo i inženjersku seizmologiju (IZIIS) u Skoplju, u Makedoniji [14].

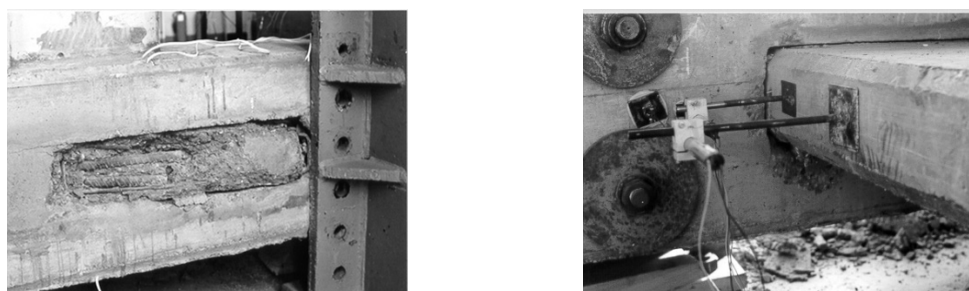
Program realizovanih eksperimenata obuhvatio je pet karakterističnih konstruktivnih veza i nekonstruktivnih segmenata:

- vezu međuspratne grede sa ugaonim stubom, slika 6,
- oslanac međuspratne koritnice, slika 8,
- vezu stuba sa čašicom temeljne stope, slika 10,
- vezu oslabljenog stuba na mestu oslanjanja međuspratnih nosača, slika 12,
- vezu i kontinuitet za prijem negativnog momenta na mestu oslanjanja koritnica iz dva polja, slika 14.

U nastavku je dat opis modela svih ispitivanih veza, rezultati u obliku dijagrama sila-pomeranje, kao i diskusija rezultata.



Slika 6 – Dispozicija uzoraka EM-1, EM-2 veze međuspratne grede sa ugaonim stubom. Eksperimentalna zavisnost sila-pomeranje



Slika 7 – Lom veze grednog nosača sa stubom: Model EM-1 (levo); Model EM-2 (desno).

3.2.1 Modeli EM-1 i EM-2

Veza međuspratne grede sa ugaonim stubom ispitivana je pomoću dva identična uzorka koji su označeni kao EM-1 i EM-2, slika 6, što je omogućilo utvrđivanje stvarnog nivoa potencijalne varijacije kvaliteta građenja montažne polukrute veze. Deo montažnog stuba dimenzija 50 x 50 cm oslonjen je na dva metalna oporca i pričvršćen zavrtnjevima koji obezbeđuju potpuno uklještenje. U postojeća dva ortogonalna otvora ugrađene su dve međuspratne grede, jedna kraća (za simulaciju) i jedna duža. Cilj eksperimenta je bio da se utvrdi efektivni stepen uklještenja duže standardne grede T-70 koja poseduje "pero" uvučeno u otvor ugaonog stuba. Monolitizacija ove veze je izvršena standardnim postupkom zalivanja cementnim malterom koji primenjuje izvođač.

Ispitivanje stepena uklještenja grede T-70 realizovano je pod simultanim dejstvom konstantne aksijalne sile i ciklične transverzalne sile aplicirane putem ciklične istorije pomeranja sa različitim amplitudama do loma, slika 7. Na ovaj način je registrovan intenzitet sile za svaku vrednost pomeranja i dobijena je histerezisna zavisnost sila-pomeranje. Primenjenom instrumentacijom za kritičan poprečni pravac omogućeno je registrovanje rotacija pri svakom iznosu sile. Na ovoj način, koristeći poznatu silu, dobijena je vrednost momenta savijanja, a samim tim i generisane realne histerezisne zavisnosti moment-rotacija ($M-\phi$), koje imaju veliki značaj pri formulisanju modela za simulaciju realnog ponašanja polukrutih veza. Oblik ovih zavisnosti je veoma sličan dobijenim histerezisnim zavisnostima sila-pomeranje [12].

Zaključci izvedeni na osnovu ispitivanja modela EM-1 i EM-2 su:

- Oblik histerezisnih dijagrama za oba modela je veoma sličan;
- U prvoj fazi rada veze (za manje ciklične deformacije) konstruktivna veza prima manju silu, a zatim se javlja faza "tečenja" koju karakteriše zadržavanje konstantne sile za opseg značajnih deformacija u intervalu $\pm 30 - 40\text{mm}$;
- Za veće zadate deformacije u završnoj fazi konstruktivna veza pokazuje tendenciju očvršćavanja, što se manifestuje prijemom povećanih poprečnih sila i porastom deformacija;
- Konstruktivna veza je ispitivana zadavanjem relativno male aksijalne sile pritiska i

registrovana histerezisna zavisnost je validna za takve uslove u praksi;

- Pri dejstvu zemljotresa, u dinamičkim uslovima, realne aksijalne sile u određenom trenutku mogu izazvati zatezanje elementa. To stanje mora biti obezbeđeno tako što će veza biti unapređena dodatnim uređajem koji će sprečiti izvlačenje "pera" iz predviđenog ležišta;
- Da bi se postigla sigurnost ove veze i za dejstvo najjačih zemljotresa, neophodno je unaprediti postojeću tehnologiju formiranja veze glavnog nosača i ugaonog stuba;
- Realno, za ovu vezu nije dovoljno da se zadovolje propisani i definisani uslovi samo prema postojećim propisima koji se odnose na okvirne AB sisteme. Za sisteme industrijskih hala sa montažnim vezama, ova značajna konstruktivna veza treba da bude unapređena i projektovana za sva moguća kompleksna dinamička dejstva sa "kritičnim ekscesnim uslovima i kombinacijama opterećenja".

3.2.2 Modeli EM-3 i EM-4

Eksperimentalno ispitivanje karakteristika nelinearnog ponašanja veze za kontinuitet za ciklično dejstvo negativnog momenta na mestu oslanjanja koritnica iz dva susedna polja je izvršeno na dva fizička modela označena kao EM-3 i EM-4. Kod modela EM-3 AB sloj za kontinuitet je armiran jednim slojem mrežaste armature, dok je kod modela EM-4, AB sloj armiran sa dva sloja mrežaste armature. Dispozicija ispitivanih modela EM-3 i EM-4 sa instrumentima za akviziciju eksperimentalnih rezultata prikazana je na slici 8.

Montažne koritnice iz dva polja oslanjaju se na T-nosač, a zatim je preko njih betoniran na licu mesta armiranobetonski sloj za ostvarivanje potrebnog kontinuiteta. Pri tome je primenjena odgovarajuća ankerna armatura (mestimični ankeri) za ostvarivanje veze između starog betona montažnih koritnica i novog betona upotrebljenog na licu mesta za AB ploču kojom se ostvaruje monolitizacija i kontinuitet.

Obe armiranobetonske koritnice su na svojim krajevima oslonjene na dva metalna oslonca sa fizičkom simulacijom pokretnih ležišta koja se linijski oslanjaju na armaturu većeg prečnika.

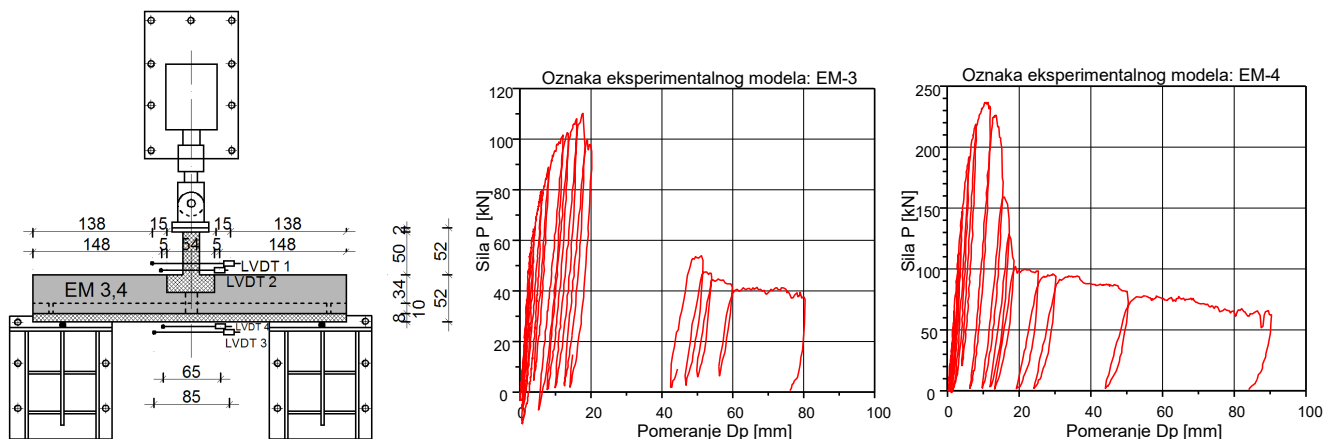
U sredini raspona, gde se koritnice oslanjaju na montažni T-nosač, iskorišćeno je rebro T-nosača za zadavanje ciklične sile pritiska kojom se izaziva

pojava negativnog momenta sa postepenim uvećanjem do loma, što je i cilj eksperimentalnog ispitivanja.

Eksperimentalno ispitivanje realizovano je zadavanjem ciklične sile pritiska do određenog iznosa u datom ciklusu, a odmah zatim je sledilo rasterećenje do veoma male sile pritiska, odnosno skoro do nule.

Tokom celog eksperimenta korišćena je propisana istorija pomeranja sa rastućim amplitudama

deformacija. U prvom ciklusu je zadata veoma mala deformacija posle koje se pri rasterećenju ne javlja zaostala deformacija. Porastom deformacija u narednim ciklusima javljaju se plastične deformacije, čija vrednost postepeno raste.



Slika 8 – Dispozicija uzoraka EM-3 i EM-4 veze na mestu oslanjanja koritnica iz dva susedna polja. Eksperimentalna zavisnost sila-pomeranje.



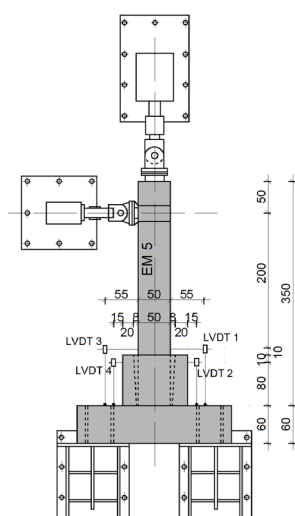
Slika 9 – Model EM-3: Velike deformacije veze na mestu oslanjanja (levo); Model EM-4: Velike pukotine u ploči za kontinuitet.

Zaključci u vezi modela EM-3 i EM-4 koji su geometrijski bili identični, a sa različitom armaturom za kontinuitet u AB ploči:

- Ispitivana konstruktivna veza za kontinuitet koritnica iz dva susedna polja pokazuje ujednačen kvalitet građenja pošto su dobijene histerezisne zavisnosti za dva nezavisna ispitivanja po obliku skoro identične, a razlika u iznosu sila granične nosivosti adekvatno odražava razliku u armiranju AB sloja za kontinuitet;

- U prvoj fazi rada veze, do dostizanja granične sile nosivosti, javlja se blaga nelinearnost anvelopne krive za sve ponovljene cikluse;
- Posle dostizanja granične sile nosivosti, za svaki naredni ciklus opterećenja i rasterećenja dolazi do naglog pada sile nosivosti. Granična sila nosivosti ove veze posle pada ostaje na nivou od oko 1/3 maksimalne registrovane granične sile nosivosti, odnosno do pojave krtoeg loma, slika 9;

- Uvećan procenat armiranja značajno i direktno povećava graničnu silu nosivosti;
- Ovaj eksperiment ukazuje na realno ciklično ponašanje veze samo za dejstvo cikličnog negativnog momenta kada su krak unutrašnjih sila pritiska u betonu i zatezanje u armaturi najveći.
- U slučaju zemljotresnog dinamičkog dejstva bi krak sila bio veoma mali za pozitivne momente savijanja, a zategnuta armatura čak nebi ni postojala. Granična sila nosivosti u tom slučaju bi bila veoma mala, što je nepovoljno.
- Za dinamička dejstva u slučaju jakih zemljotresa, neophodno se nameće potreba da se postojeća konstruktivna veza ovog tipa na mestu gde se oslanjaju koritnice iz dva susedna polja, tehnološki unapredi. Posle toga, karakteristike inovirane veze bi trebalo u celini da budu eksperimentalno verifikovane.



Slika 10 – Dispozicija uzorka EM-5 veze AB stuba u čašici. Eksperimentalna zavisnost sila-pomeranje(F-D).

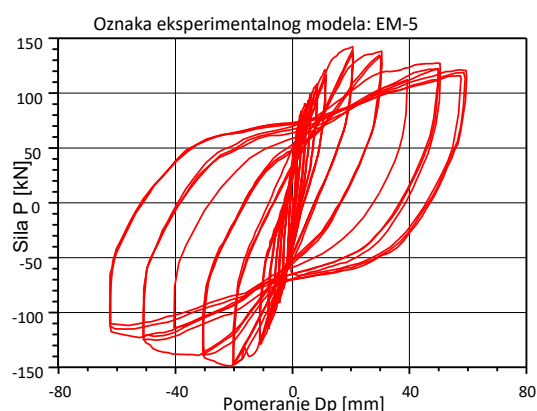


Slika 11 – Model EM-5: Prikaz pukotina u modelu i dela slomljenog zaštitnog sloja

3.2.3 Model EM-5

Eksperimentalno ispitivanje karakteristika nelinearnog ponašanja veze montažnog armiranobetonskog stuba sa čašicom temeljne stope izvršeno je na modelu EM-5. Dispozicija ispitivanog modela EM-5 sa instrumentima za akviziciju eksperimentalnih rezultata prikazana je na slici 8. Fizički model ove veze u osnovi poseduje AB temeljnu stopu na kojoj je u prirodnoj veličini i sa potrebnom armaturom izvedena armiranobetonska čašica sa otvorom u kome se montira montažni armiranobetonski stub. Eksperimentalni model čini deo AB stuba potrebne dužine sa realnom armaturom. Posle montaže, AB stub je adekvatno zaliven u formiranu čašicu, primenjujući proceduru kao u praksi. Na drugom kraju stuba formirane su odgovarajuće veze za aplikaciju konstantne aksijalne sile i poprečne ciklične sile u toku realizacije eksperimenta.

Za izvođenje kompletnog eksperimenta korišćena je propisana ciklična istorija pomeranja sa rastućim amplitudama.



Sumirajući rezultate na osnovu kojih su sagledane realne karakteristike ponašanja veze montažnog AB stuba sa čašicom temeljne stope konstatovano je:

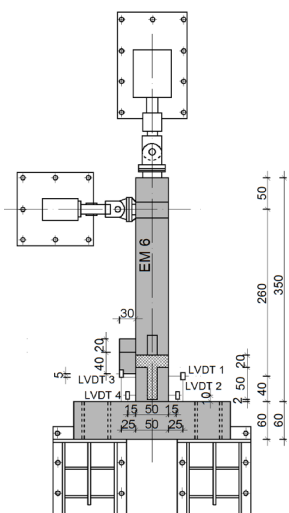
- U toku realizacije kompletnog eksperimentalnog ispitivanja, uključujući i dostizanje maksimalne sile nosivosti, nisu uočena nikakva oštećenja čašice;
- Forma i način armiranja čašice obezbeđuju uspešno i pouzdano tehnološko rešenje;
- Razvoj pukotina u stubu pravilno propagira sve do dostizanja maksimalne sile nosivosti, što rezultira pravilnom anvelopnom krivom

kojom se manifestuje realna nelinearnost stuba za ciklično dejstvo opterećenja;

- Granična sila nosivosti smanjuje se postepeno pri većim deformacijama;
- Montažni armiranobetonski stub u toku celog eksperimentalnog ispitivanja pokazuje veoma stabilno nelinearno histerezisno ponašanje, što je veoma pozitivno;
- Duktilnost kritičnog poprečnog preseka AB stuba je sasvim zadovoljavajuća, što ukazuje na to da je tehnologija projektovanja i građenja montažnih stubova sa ovakvom vezom sa čašicom temelja sasvim korektna i da nisu potrebne nikakve korekcije.

3.2.4 Model EM-6

Eksperimentalno ispitivanje karakteristika nelinearnog ponašanja veze oslabljenog stuba na mestu veze sa međuspratnim nosačima izvršeno je na fizičkom modelu u prirodnoj veličini označenom kao

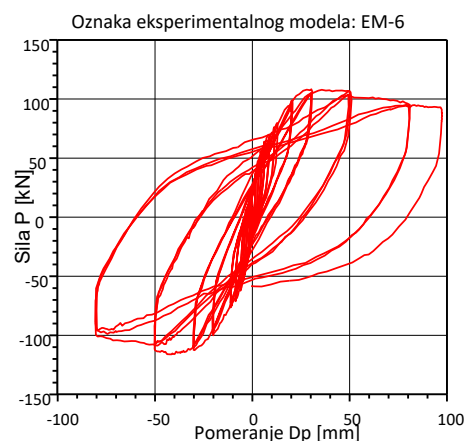


Slika 12 – Dispozicija uzorka EM-6 oslabljenog AB stuba na mestu veze sa međuspratnim gredama. Eksperimentalna zavisnost sila-pomeranje.

EM-6. Dispozicija ispitivanog modela sa predviđenim instrumentima za akviziciju eksperimentalnih rezultata prikazana je na slici 9. Fizički model ove veze formiran je tako što je ispod oslabljenog preseka stuba betonirana kruta baza u koju je uklešten stub sa delom oslabljenog preseka. Pri tome, kruta baza je iskorišćena u laboratoriji za njeno fiksiranje za dva metalna oporca simulirajući potpuno uklještenje. Na delu oslabljenog stuba umetnuti su segmenti montažnih horizontalnih greda zaliveni cementnim malterom. Na taj način je realno simulirana veza oslabljenog stuba sa međuspratnim nosačima.

Na drugom kraju stuba formirane su odgovarajuće veze za aplikaciju konstantne aksijalne sile i poprečne ciklične sile u toku realizacije kvazi-statičkog ispitivanja do stadijuma loma.

Za ovo ispitivanje korišćena je ciklična istorija pomeranja sa rastućim amplitudama u svakom narednom ciklusu.



Slika 13 – Model EM-6: Prikaz propagacije pukotina u modelu

Imajući u vidu nelinearne karakteristike ponašanja veze oslabljenog stuba na mestu veze sa međuspratnim nosačima, mogu se izvući sledeći zaključci:

- Eksperimentalni rezultati ukazuju da je nelinearno ponašanje veze oslabljenog stuba na mestu veze sa međuspratnim nosačima veoma stabilno;
- Ova konstruktivna veza pokazuje punu stabilnost nelinearnosti, od početka do loma i to za dejstvo simulirane (obostrane) sile opterećenja;

- Razvijanje pukotina i njihova propagacija u stubu je pravilno distribuirana sve do dostizanja maksimalne sile nosivosti;
- Anvelopna kriva nelinearnog histerezisnog dijagrama je stabilna i simetrična za oba pravca opterećenja do loma;
- Granična sila se postepeno smanjuje za veće deformacije, što ukazuje da veza na oslabljenom delu stuba poseduje veoma dobru duktilnost;
- Sve pozitivne nelinearne karakteristike ukazuju da je veza oslabljenog stuba sa međuspratnim gredama korektno projektovana i izvedena;
- Kako u slučaju jakih zemljotresa međuspratni nosači mogu biti opterećeni i zatežućim silama, pozitivno ponašanje ove veze može biti dovedeno u pitanje. Preporučuje se da se tehnologija izvođenja veze unapredi dodatnim sigurnosnim elementima koji bi obezbedili

prijem zatežućih sila i povoljno nelinearno ponašanje veze.

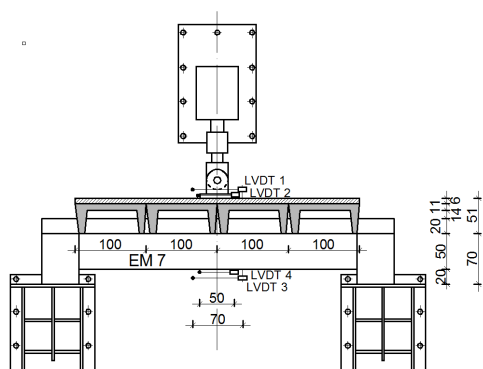
3.2.5 Model EM-7

Eksperimentalno ispitivanje kapaciteta nosivosti nosača međuspratne konstrukcije, zajedno sa delovima oslonjene međuspratne koritnice, izvršeno je na fizičkom modelu EM-7, slika 10.

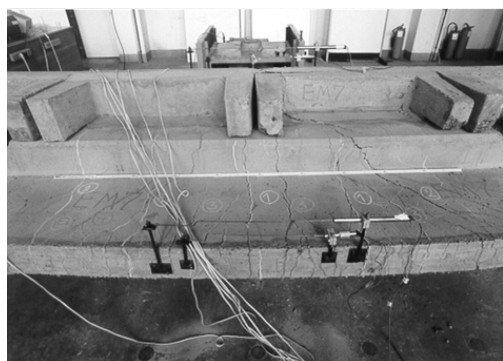
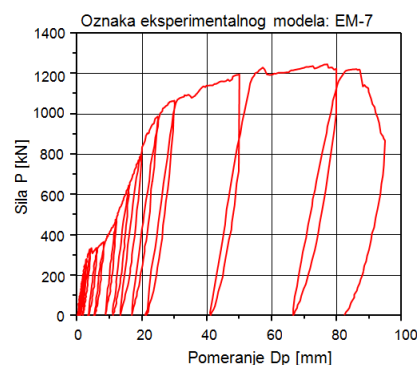
Fizički model ispitivanog nosača je formiran u saglasnosti sa realnim uslovima. Najpre je projektovan deo nosača sa realnim osloncima na oba kraja, koji su poslužili da obezbede adekvatno pričvršćavanje istih za dva oporca koji obezbeđuju uslove veoma krutog oslonca.

Na nosač su oslonjene montažne koritnice, a zatim je betoniran sloj betona za izravnanje i povezivanje. Tako je formiran nosač međuspratne konstrukcije koji uključuje delove međuspratne konstrukcije.

Na sredini nosača izvedena je adekvatna veza za nanošenje ciklične sile pritiska hidrauličkim pistonom.



Slika 14 – Dispozicija uzorka EM-7 sredine montažnog AB međuspratnog nosača. Eksperimentalna zavisnost sila-pomeranje (F-D).



Slika 15 – Model EM-7: Prikaz širokih pukotina u modelu u zoni kritičnog poprečnog preseka

Eksperimentalno ispitivanje veze realizovano je aplikacijom ciklične sile za opterećenje i rasterećenje. Sila pritiska se najpre povećava do određenog iznosa i odmah zatim sledi rasterećenje do približno nulte vrednosti sile pritiska.

Za realizaciju eksperimenta korišćena je propisana istorija pomeranja sa rastućim amplitudama deformacija. Porastom deformacije u svakom narednom ciklusu, pri rasterećenju modela dobijaju se sve veće plastične deformacije.

Sumiranjem uočenih fenomena realnog nelinearnog ponašanja i uvidom u ostvareni kapacitet nosivosti nosača međuspratnih konstrukcija, zajedno sa međuspratnim koritnicama, izvedeni su sledeći zaključci:

- Početno stanje nelinearnog ponašanja modela je neočekivano, i to za zadata pomeranja $D \leq 10\text{mm}$. Evidentno je da početna krutost nije poremećena do vrednosti sile od 300kN , a zatim nastaje uvećanje deformacija bez značajnog porasta sile, tj. dolazi do promene krutosti. Na slici 15 je dat prikaz širokih pukotina u modelu u zoni kritičnog poprečnog preseka;
- Ovaj fenomen nije iznenađujući i rezultat je formiranja preseka od dva montažna elementa i njihove naknadne monolitizacije. Prvi element je greda, drugi element su koritnice. Zajednički rad kompletnog preseka zavisi od načina monolitizacije;
- Posle dostizanja pomeranja od $10\text{--}15\text{mm}$ nastaje novi značajan porast. Maksimalna registrovana sila dostiže izuzetno veliku vrednost, veću od 1200 kN . Time se potvrđuje da spregnuti presek pokazuje veliki kapacitet nosivosti zbog prisustva koritnica, koje primaju unutrašnje sile pritiska i povećavaju krak unutrašnjih sila;
- Duktilnost preseka za ovaj slučaj opterećenja je sasvim zadovoljavajuća. Ako bi se konstruktivno obezbedilo da međuspratne grede sa koritnicama ne primaju negativne momente, ovo konstruktivno rešenje je sasvim prihvatljivo uz neznatno poboljšanje uslova sprezanja.

4 ZAKLJUČAK

Rezultati sprovedenog eksperimentalnog ispitivanja veza montažne AB noseće konstrukcije industrijske hale na modelima u pravoj veličini pri dejstvu cikličnih opterećenja do loma poslužili su za izvođenje zaključaka o ponašanju i otpornosti tih veza u seizmičkim uslovima.

Sve ispitivane veze su pokazale karakteristike nelinearnog ponašanja za sve karakteristične poprečne preseke. Ovo ukazuje na potrebu definisanja realnih nelinearnih histerezisnih modela moment-rotacija za različite poprečne preseke eksperimentalnim putem, ispitivanjem uzoraka u prirodnoj veličini do loma, kako bi se u matematičkom modelu omogućilo simuliranje stvarne nelinearnosti.

Konstatovano je da treba unaprediti tehnologiju formiranja veze glavnog nosača i ugaonog stuba, veze na mestu oslanjanja koritnica iz dva susedna polja, kao i veze oslabljenog stuba sa međuspratnim

nosačima, kako bi se postigla sigurnost u slučaju jakih zemljotresa.

Imajući u vidu posledice neadekvatnog projektovanja montažnih industrijskih hala u seizmički aktivnim područjima, nameće se potreba da se unapredi koncept projektovanja i proračuna objekata ovog tipa, posebno kada se planira serijska proizvodnja. U slučaju tipskih montažnih AB konstrukcija hala neophodno je u fazi projektovanja kombinovati rezultate eksperimentalnog ispitivanja veza i analitička rešenja u cilju realnog modeliranja njihovih karakteristika, a zatim sprovesti nelinearnu dinamičku seizmičku analizu konstrukcije. Na taj način se dobija najrealnija slika seizmičkog ponašanja objekta, što je glavni preduslov za projektovanje seizmički otporne konstrukcije kod koje će biti izbegnuta velika oštećenja i rušenja kakva su se događala u prošlosti na montažnim industrijskim objektima. Ovo je opravdan projektantski pristup koji obezbeđuje izradu pouzdanog industrijskog proizvoda i značajnu redukciju seizmičkog rizika, pri čemu se definisana pouzdana konstruktivna rešenja mogu kasnije široko primeniti za različite vrste objekata.

ZAHVALNOST

Zahvaljujemo se Ministarstvu nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije za finansijsku podršku pri realizaciji ovog istraživanja. (Ugovor o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada NIO u 2024. godini, evidencioni broj: 451-03-65/2024-03/200095).

LITERATURA

- [1] Blakeborough, A., Merriman, P.A., Williams M.S. (Eds.): **The Northridge California Earthquake of 17 January 1994, a Field Report by EEFIT**, Institution of Structural Engineers, London, 1994. <https://www.eeri.org/1994/01/northridge-california/>
- [2] Muguruma Hiroshi, Nishiyama Minehiro, Watanabe Fumio: **Lessons learned from the Kobe earthquake, A Japanese perspective**. *PCI Journal*, 40 (4), 28-42, 1995. <https://doi.org/10.15554/pci.07011995.28.42>
- [3] Zhao Bin, Taucer Fabio, Rossetto Tiziana: **Field investigation on the performance of building structures during the 12 May 2008 Wenchuan earthquake in China**. *Engineering Structures*, 31(8), 1707–1723, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.02.039>
- [4] Posada Mauricio, Wood L. Sharon: **Seismic performance of precast industrial buildings in**

- Turkey. *Seventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Boston, MA, USA, July 21-25, 2002.
- [5] Senel Sevket Mural, Kayhan Ali Haydar: **Fragility based damage assessment in existing precast industrial buildings: A case study for Turkey.** *Structural Engineering and Mechanics*, 34(1), 39-60, 2010. <http://dx.doi.org/10.12989/sem>.
- [6] Marzo Anna, Marghella Giuseppe, Indirli Maurizio: **The Emilia-Romagna earthquake: Damages to precast /prestressed reinforced concrete factories.** *Ingegneria Sismica*, XXIX (2-3), 132-147, 2012.
<https://www.researchgate.net/publication/259911421>
- [7] Akkose Mehmet, Sunca Fezayil, Turkay Alperen: **Pushover analysis of prefabricated structures with various partial fixity rates.** *Earthquakes and Structures*, 14(1), 21-32, 2018.
<https://doi.org/10.12989/eas.2018.14.1.021>
- [8] Guerrero Hector, Rodriguez Vladimir, Escobar J. Alberto, Alcocer M. Sergio, Bennetts Felipe, Suarezc Manuel: **Experimental tests of precast reinforced concrete beam-column connections.** *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 125, 1-14, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105743>
- [9] Elliott Kim **Precast concrete structures (2nd ed.).** *Taylor & Francis Group, CRC Press*, 2017. ISBN 978-1-4987-2399-2
- [10] Zdravković Slavko, Zlatkov Dragan, Mladenović Biljana, Mijalković Marina: **Seismic analysis of plane linear systems with semi-rigid connections.** *Earthquake Resistant Engineering Structures VII*, WITpress, 105-115, 2009. ISBN: 978-1-84564-180-1
- [11] Fardis Michael, Carvalho Eduardo, Fajfar Peter, Pecker Alain: **Seismic Design of Concrete Buildings to Eurocode 8.** *Taylor & Francis Group, CRC Press*, 2015. ISBN-13: 978-1-4822-8253-5
- [12] Zlatkov Dragan: **Teorijska i eksperimentalna analiza armiranobetonskih linijskih nosaca sa polukrutim vezama.** Doktorska disertacija, Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu, 2015.
<http://eteze.ni.ac.rs/?generalSearchCriterion=Dragan+Zlatkov>
- [13] **Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju objekata visokogradnje u seizmičkim područjima,** *Službeni glasnik SFRJ*, 29/83. Beograd, 1983.
- [14] Ristić D., Zisi N., Micov V., Sesov N., Zdravković Slavko, Zlatkov Dragan: **Attesting of Static and Seismic Stability of Typified Modules of Hall Programme of Precast RC Structural System**
- AMONT, Krusce, Vol. I-V. *Reports 98(36-40)*, IZIIS, Skopje, 1998.