

ПРИНЦИПИ ПРОЈЕКТОВАЊА СЕИЗМИЧКИ ОТПОРНИХ МОНТАЖНИХ БЕТОНСКИХ КОНСТРУКЦИЈА

Јелена Ђукић¹
Даница Голеш²

УДК: 624.012.3.042.7
DOI: 10.14415/zbornikGFS27.08

Резиме: Резултати истраживања понашања монтажних бетонских конструкција при земљотресу у земљама изложеним сеизмичким дејствима послужили су као основа за обимну студију коју је реализовала fib-ова Радна група 7.3 Монтажне / преднапрегнуте конструкције пројектоване на земљотресну отпорност. Истраживања су показала да је један од основних предуслова за остваривање сеизмичке отпорности ових конструкција правилно обликовање веза конструктивних елемената. У овом раду су приказана досадашња искуства са употребом монтажних бетонских конструкција у сеизмичким подручјима, са посебним освртом на лекције научене из прошлих земљотреса, из којих су проистекле препоруке за пројектовање сеизмички отпорних монтажних бетонских конструкција. Неке од најважнијих препорука приказане су у овом раду.

Кључне речи: Монтажне бетонске конструкције, сеизмичка отпорност, препоруке за пројектовање

1. УВОД

Монтажни начин грађења бетонских конструкција доживео је успон у другој половини прошлог века, пре свега захваљујући напретку у примени преднапрегнутог бетона. Данас префабриковани елементи од армираног и/или претходно напрегнутог бетона, због бројних предности овог начина грађења (табела 1), имају значајну примену и у конструкцијама отпорним на сеизмичке утицаје у свим деловима света, упркос томе што су подаци о монтажним бетонским конструкцијама (МБК) и њиховој сеизмичкој отпорности до недавно били врло оскудни.

Дуго се сматрало се да сеизмичка отпорност МБК није на нивоу монолитних конструкција. Сумњу у погледу њихове пузданости су повећавала и озбиљна оштећења (у неким случајевима и потпуни колапс) одређеног броја префабрикованих зграда током ранијих земљотреса [1], што је резултирало конзервативном техничком регулативом у овој области, ограничавањем примене

¹ Јелена Ђукић, дипл. инж. грађ., е-маил: djukicjelena.01@gmail.com

² Доц. др Даница Голеш, дипл. инж. грађ., Грађевински факултет Суботица, Козарачка 2а, тел: 024/554-300, е-маил: dgoles@gf.uns.ac.rs

префабрикованих бетонских елемената, те захтевима за додатним мерама ојачања ових конструкција у сеизмички активним подручјима.

Табела 1. Предности и недостаци градње префабрикованим бетонским елементима [1]

Предности	Недостаци
<ul style="list-style-type: none"> • Брже грађење (скраћење рока изградње) • Висок квалитет елемената • Повећање трајности • Смањење радне снаге • Смањење употребе оплате • Спајање елемената преднапрезањем • Добро затварање прслина након земљотреса. 	<ul style="list-style-type: none"> • Посебне методе спајања појединачних елемената у циљу осигурања сеизмичке отпорности • Потребна повећана контрола квалитета • Велике тежине елемената • Мале толеранције мера • Могућност нестанка силе преднапрезања.

Овакво стање је наметнуло потребу детаљнијих истраживања. Под окриљем *fib* формирана је Радна група 7.3: Монтажне/преднапрегнуте конструкције пројектоване на земљотресну отпорност, која је спровела обимну студију, те своје налазе објавила у Билтену [1]. Истраживања су показала да, уз пажљиво пројектовање и извођење, префабриковани армиранобетонски и преднапрегнути елементи могу бити врло успешно примењени у сеизмички отпорним конструкцијама. С друге стране, лоше пројектоване и изведене МБК су у условима земљотреса доживљавале озбиљна оштећења, па и рушење, највише захваљујући кртом (недуктилном) понашању лоше изведених детаља веза елемената и самих елемената, те неправилном концепцијом конструктивног система.

Намера је аутора да у овом раду прикажу најзначајнија искуства у примени МБК у сеизмичким подручјима широм света и укажу на предности и недостатке различитих решења, као и препоруке за пројектовање сеизмички отпорних монтажних бетонских конструкција. Као полазна основа послужило је истраживање првог аутора у склопу израде семинарског рада из предмета Монтажне бетонске конструкције на Грађевинском факултету у Суботици, као и сам семинарски рад [2].

2. ИСКУСТВА ИЗ ПРЕТХОДНИХ ЗЕМЉОТРЕСА

Искуства из прошлих земљотреса у земљама Европе, Азије (пре свега Јапана), Северне, Централне и Јужне Америке и Новог Зеланда је показало да добро пројектоване и изведене МБК, са брижљиво решеним детаљима, имају врло добро понашање при дејству земљотреса. Монтажне конструкције од преднапрегнутог бетона су се посебно добро показале у Јапану, током Кобе земљотреса 1995. [1], што се објашњава следећим чињеницама:

- Ове конструкције су пројектоване за виши ниво оптерећења него остали типови конструкција;

- Монтажне конструкције од преднапрегнутог бетона најчешће имају правилан облик, у основи симетричан распоред елемената за пријем хоризонталних сила, те равномеран распоред маса и крутости по висини;
- Ове конструкције најчешће имају висок квалитет извођења, уз примену бетона веће чврстоће и бољег квалитета;
- Ово су махом новије конструкције, пројектоване према новијој техничкој регулативи.

С друге стране, велики број префабрикованих конструкција мостова и зграда је током протеклих земљотреса претрпео значајна оштећења, а у неким случајевима и потпуни колапс. У даљем тексту ће бити наведени и објашњени најчешћи узроци ових оштећења [1], [3].

2.1 Неправилно пројектовање и детаљи дуктилних елемената

Велики број рамовских МБК је доживео озбиљна оштећења или рушење током земљотреса, као последицу неправилне концепције конструкције и лоших детаља. Најчешће се радило о вишеспратним конструкцијама, са таваницама од ошупљених плоча које су биле лоше спојене са елементима рама, без зидова за укрућење, или са зидовима који су имали велике отворе. Стубови су настављани заваривањем подужне арматуре, што је резултирало значајним ексцентрицитетом шипки у зони наставка. Подужна арматура није имала довољну дужину сидрења. Узенгије су постављане на великом размаку, те нису биле у стању да утегну бетонски пресек, нити да прихвате затезање од смичућих напона услед трансверзалних сила. У оваквим конструкцијама се нису могли формирати пластични зглобови у основама стубова, па је долазило до појаве кртог лома услед смицања, губитка приањања или губитка утегнутог језгра бетона. Примери кртог лома префабрикованих стубова услед смицања приказани су на слици 1.



Слика 1. Крти лом стуба услед смицања. Лево - Кокаели земљотрес, Турска, 1999. г.; Десно - Нортриџ земљотрес, Калифорнија, 1994. г. [1]

Као добро концептуално решење ниских МБК показао се систем дуктилних стубова и зидних панела, у којима се одвија дисипација енергије, адекватно повезаних са крућим међуспратним конструкцијама.

2.2 Неадекватно дејство дијафрагме

Међуспратне плоче, поред тога што носе гравитациона оптерећења, морају бити у стању да, делујући као круте хоризонталне дијафрагме, пренесу сеизмичке силе на носећу конструкцију. Правилно пројектоване везе за пренос сила дијафрагме и правилно ослањање међуспратне плоче, основни су захтеви за сигурну конструкцију.

Оштећења МБК у земљотресима, која се везују за дејство дијафрагме, најчешће су последица недовољне крутости таванице у својој равни (танке, флексибилне плоче), слабе међусобне везе елемената таванице, које нису у стању да преузму и пренесу смичуће силе, као и слабе везе између таванице и елемената рамовске конструкције и/или зидних панела.

2.3 Лоши детаљи спојева и веза

Лоше решени детаљи веза префабрикованих бетонских греда и стубова један су од најчешћих узрока оштећења МБК у земљотресу. Најчешће уочена оштећења су:

- појава кртог лома шипки арматуре у близини варова,
- клизање греда са ослонаца (врхова стубова или кратких елемената),
- лом везе због спадања матица услед значајног савијања флексибилних вијака,
- лом везе због погрешног позиционирања трна за везу стуба и греде - трн постављен изван подужне арматуре стуба, у заштитном слоју бетона,
- чупање трнова за везу стуба и греде због недовољно густе и слабо усидрене попречне арматуре.



Слика 2. Лом префабриковане рамовске конструкције услед удара о суседне конструкције, Микоакан земљотрес, Мексико Сити, 1985. г. [1]

2.4 Неадекватно одвајање неконструктивних елемената

При пројектовању МБК често се игнорише улога неконструктивних елемената у пријему хоризонталних сила при земљотресу. Овакав третман захтева и адекватно извођење, како би се постављене претпоставке практично реализовале. У противном може доћи до оштећења елемената и конструкције.

На пример, услед непланираног активирања крутих зидова испуне у пријему хоризонталних сила, може се јавити смичући лом стубова на месту горње ивице зида испуне.

2.5 Неадекватно растојање између суседних конструкција

Префабрикована конструкција паркинга у Мексико Ситију делимично се обрушила 1985. године у Микоакан земљотресу (слика 2). Ова рамовска конструкција трпела је велике ударе од суседног објекта због неадекватно пројектованог њиховог међусобног размака. Ово указује на неопходност пажљивог планирања разделница између суседних објеката [4].

3. ПРОЈЕКТОВАЊЕ СЕИЗМИЧКИ ОТПОРНИХ МОНТАЖНИХ БЕТОНСКИХ КОНСТРУКЦИЈА

При пројектовању сеизмички отпорних конструкција уопште треба, колико је то могуће, усвајати једноставан и правилан облик конструкције у основи и по висини. Када се овај услов не може испунити, конструкција се помоћу дилатационих разделница може поделити на динамички независне конструктивне целине правилног и једноставног облика.

У циљу избегавања појаве кртог лома појединих елемената, као и прогресивног лома конструкције услед сеизмичког дејства, при пројектовању се примењује метод заснован на програмираном понашању, у којем се бирају и на одговарајући начин пројектују и обликују елементи за дисипацију енергије при великим деформацијама, док се осталим конструктивним елементима обезбеђује довољна носивост. Овим се добија хијерархија носивости разних конструкцијских делова и облика ломова, те обезбеђује одговарајући пластични механизам [5].

У циљу обезбеђења способности дисипације енергије при цикличним условима, посебну пажњу треба посветити детаљима веза између конструкцијских елемената и областима у којима се предвиђа нелинеарно понашање.

Прорачунски модел мора бити одабран у складу са очекиваним понашањем, тако да обухвати све меродавне утицаје (нпр. деформације тла, утицај неносећих елемената, близина и утицај суседних објеката и сл.), те да адекватно прикаже расподелу крутости и масе. Притом треба имати у виду да је, због случајне природе сеизмичког дејства и непоузданости постеластичног цикличног понашања бетона, укупна непоузданост код сеизмичких дејстава знатно виша него код несеизмичких [6].

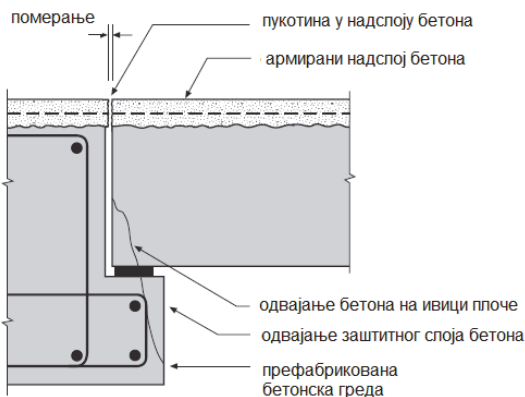
Неопходно је развијати нове и побољшавати постојеће начине пројектовања сеизмички отпорних МБК, како би се префабрикација учинила конструктивно и економски одрживим решењем [7].

3.1 Пројектовање префабрикованих елемената сеизмички отпорних конструкција

У сеизмичким областима аспект сеизмичког хазарда мора да се узме у обзир у раним фазама идејног пројектовања конструкција, чиме се омогућава остварење конструкцијског система који, са прихватљивим трошковима, задовољава основне

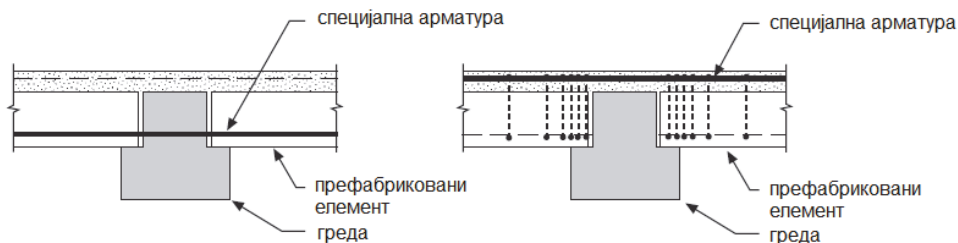
захтеве пројектовања [5]. Неке од основних препорука правилног пројектовања елемената сеизмички отпорних МБК дате су у даљем тексту.

Префабриковане међуспратне плоче. Међуспратне плоче треба да се понашају као хоризонталне дијафрагме које прихватају инерцијалне силе и равномерно их преносе на остале конструктивне елементе. На овај начин оне обезбеђују да се вертикални носећи елементи понашају као целина при сеизмичким дејствима. Правилно пројектоване везе за пренос сила дијафрагме и правилно ослањање међуспратне плоче су предуслови за постизање поуздане конструкције [2].



Слика 3. Оштећење на месту налегања међуспратне плоче [6]

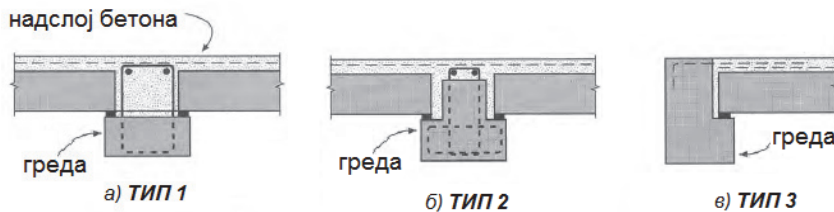
Монолитни армирани надсплој бетона (слика 4) је најефикасније решење за повезивање свих делова међуспратне таванице у целину, иако се на овај начин повећава и тежина конструкције. У ову сврху се могу користити и механичка спојна средства, која захтевају посебну пажњу како би се избегла висока концентрација напона и крти лом.



Слика 4. Употреба специјалне арматуре за монолитизацију међуспратне плоче [6]

Префабриковане греде. Префабриковане греде, које су у фази монтаже најчешће слободно ослоњене, конструкцијски се спајају са стубовима и/или зидовима. Спојеви морају омогућити пренос хоризонталних сила за сеизмичку прорачунску ситуацију, не рачунајући на трење [5]. У сеизмички отпорним МБК успешно се примењују следећи типови греда:

- 1) Греда чија је горња површина испод доње ивице међуспратне плоче (слика 5.а). Овим се минимизира тежина греде за транспорт и подизање, и поједностављују везе на крајевима, али се најчешће захтева подупирање током извођења.
- 2) Греда са горњом површином у нивоу горње површине међуспратне плоче (слика 5.б). На овај начин се елиминише потреба за подупирањем на средини распона греде, што редукује моменте савијања од сталног оптерећења и захтевану дуктилност стубова.
- 3) Греда која је целом висином префабрикована, до нивоа завршеног пода (слика 5.в). Овим се поједностављује рад на градилишту, али се захтева адекватно ослањање међуспратне плоче и пажљиво разматрање извођачких толеранција и компатибилности померања.
- 4) Префабрикована преднапрегнута "U" греда (слика 6). Често коришћена у Новом Зеланду за дуктилне рамовске конструкције висине до шест спратова, јер поједностављује монтажу арматуре у споју.



Слика 5. Типови префабрикованих греда [1]

Префабриковани стубови. Да би се осигурала минимална дуктилност и спречило локално извијање подужних шипки у примарним сеизмичким стубовима, морају се употребити узенгије пречника не мањег од 6 mm на одговарајућим растојањима. Распоред узенгија мора се одабрати тако да попречни пресек стуба, захваљујући узенгијама и везама, буде у триаксијалном напонском стању [5].

Преднапрегнути префабриковани стубови се користе код индустријских објеката и могу бити пројектовани као дуктилни користећи препоруке за дуктилне преднапрегнуте бетонске шипове.

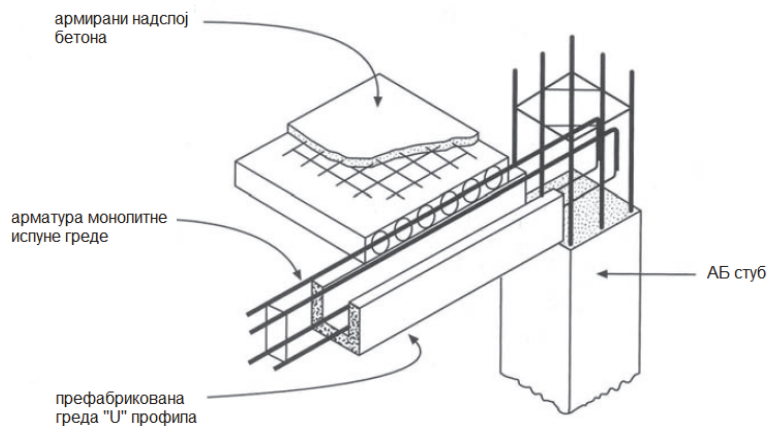
Префабриковани зидни панели. Префабриковане панелне конструкције могу опонашати монолитне, употребом преклопљених арматурних петљи и заливањем спојева бетоном или малтером (слика 7). Алтернативно, могу бити пројектоване са спојевима способним за дисипацију енергије кроз дуктилне везе или уређаје за пригушење. У циљу обезбеђења стабилности конструкције као целине пожељно је да се зидови оптерете што већим вертикалним оптерећењем, како би се избегла појава затезућих сила у хоризонталним спојницама.

3.2 Везе у сеизмички отпорним монтажним бетонским конструкцијама

Један од највећих проблема при градњи префабрикованим елементима је изналажење економичног и поузданог начина њиховог спајања. Спојеви су места са високом концентрацијом напона, која морају бити у стању да издрже велике силе и деформације током јаких земљотреса. При пројектовању спојева се треба водити принципом једноставности, у циљу лакшег извођења и бољег понашања самог

споја. У зависности од начина повезивања конструктивних елемената, МБК се могу поделити на системе који опонашају монолитне конструкције и "спојене" системе. Код прве групе конструкција примењују се два типа веза:

- 1) Јаке везе ограничене дуктилности (слике 6 и 7), које остају у домену еластичног понашања, док течење при земљотресу настаје на неком другом месту у конструкцији. Остварују се спајањем испуштених арматурних шипки помоћу спојки, на преклоп или заваривањем и накнадним заливањем споја бетоном уграђеним на лицу места; упуштањем арматуре у отворе суседних елемената и накнадним ињектирањем отвора; заваривањем или посебним механичким уређајима.
- 2) Дуктилне везе, остварене помоћу подужних шипки арматуре или накнадно затегнутих каблова са приањањем, од којих се очекује да при јаким земљотресима уђу у пост-еластично подручје.



Слика 6. Полумонтажни начин градње за остваривање крутог споја [1]



Слика 7. Везе панелне конструкције које симулирају монолитно понашање [1]

Везе "спојених" система су најчешће слабије од елемената које спајају. И овде разликујемо везе ограничене дуктилности, које се обично изводе као "суве", заваривањем или спајањем завртњима било арматурних шипки, било челичних плоча анкерисаних у елементе у току префабрикације, и дуктилне везе, најчешће

изведене помоћу накнадно затегнутих каблова без приањања, који се користе за повезивање префабрикованих елемената и који остају у области еластичног понашања.

3.3 Толеранције при производњи и уградњи

Пројектовање и конструисање сеизмички отпорних МБК захтева добро познавање производа и извођачких толеранција, могућности и ограничења процеса производње, али и разматрање сигурног начина монтаже. Детаљи веза МБК од којих се захтева сеизмичка отпорност најчешће допуштају мање толеранције него код МБК од којих се не захтева отпорност на земљотрес. Ове везе су обично сложеније и често захтевају примену специјалне опреме.

При извођењу МБК треба водити рачуна о толеранцијама везаним за префабриковане елементе и спојеве (табела 2), толеранцијама при постављању у пројектовани положај и толеранцијама при повезивању.

Табела 2. Примери типичних величина толеранција елемената МБК [1]

Елемент	Дужина	Ширина	Дебљина	Положај уградних елемента
Плоче	+/- 25 mm	+/- 6 mm	+/- 6 mm	+/- 12 mm
Греде	+/- 20 mm	+/- 6 mm	+/- 6 mm	+/- 12 mm
Стубови	+/- 12 mm	+/- 6 mm	+/- 6 mm	+/- 12 mm
Зидни панели	+/- 12 mm	+/- 6 mm	+/- 6 mm	+/- 12 mm

4. ЗАКЉУЧАК

Случајна природа сеизмичког дејства, непоузданости постеластичног цикличног понашања бетона, те низ других непоузданости везаних за моделирање конструкције као целине, њених елемената и веза, као и стално увођење нових материјала, спојних средстава и технологије извођења, знатно отежавају математичко моделирање сеизмички отпорних монтажних бетонских конструкција, доводећи у питање степен поузданости ових прорачуна, па и самих конструкција. Поуздане информације о прикладности одређеног система могуће је прибавити само кроз експериментална истраживања и прикупљање података о понашању ових конструкција у земљотресима.

На основу ових искустава, у литератури су дате препоруке за пројектовање сеизмички отпорних монтажних бетонских конструкција. Као најбитнији чиниоци поуздане, сеизмички отпорне МБК истичу се: правилна конструктивна концепција, која мора да обезбеди и бочну стабилност конструкције, брижљиво пројектовани и изведени детаљи префабрикованих елемената, адекватно дејство дијафрагме, добро обликовани детаљи веза, адекватно одвајање конструктивних и неконструктивних елемената и довољна растојања између суседних објеката.

При префабрикацији, подизању елемената у пројектовани положај и њиховом повезивању треба водити рачуна о извођачким толеранцијама, које су код сеизмички отпорних МБК обично мање него код осталих МБК.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Seismic design of precast concrete building structures, fib Bulletin No. 27, **2003**.
- [2] Ђукић Ј.: *Пројектовање сеизмички отпорних монтажних бетонских конструкција – fib 27*, Семинарски рад из предмета Монтажне бетонске конструкције, **2015**.
- [3] Elliot, K.S., Jolly, C.K.: *Multi-storey Precast Concrete Framed Structures*, 2nd Edition, Wiley-Blackwell, **2013**.
- [4] *PCI design handbook*, 7th edition, Precast/Prestressed Concrete Institute, **2010**.
- [5] *EN 1998-1 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for building*, CEN European Committee for Standardization, **2004**.
- [6] *Guidelines for the Use of Structural Precast Concrete in Buildings*, Centre for Advanced Engineering, University of Canterbury Christchurch New Zeland, **1999**.
- [7] Khare, R.K., Maniyar, M.M., Uma, S.R.: Seismic performance and design of precast concrete building structures: an overview. *Journal of Structural Engineering*, **2011**., Vol. 38, No. 3, pp. 272-284.

DESIGN PRINCIPLES FOR SEISMIC RESISTANT PRECAST CONCRETE STRUCTURES

Summary: *Research results of behaviour of precast concrete structures during the earthquakes in the countries affected by seismic actions were used as a basis for a comprehensive study carried out by fib Task group 7.3 Prefabricated / Prestressed structures designed for earthquake resistance. Researches have shown that one of the main preconditions for achieving the seismic resistance of these structures is proper design of connections between structural elements. This paper presents previous experiences with use of precast concrete structures in seismic regions, with special reference to lessons learned from past earthquakes, from which recommendations for the design of earthquake-resistant precast concrete structures are derived. Some of the most important recommendations are shown in this paper.*

Keywords: *Precast concrete structures, seismic resistance, design recommendations*