

Primljen / Received: 8.4.2017.

Ispravljen / Corrected: 8.12.2017.

Prihvaćen / Accepted: 15.2.2018.

Dostupno online / Available online: 10.9.2018.

Seizmičko ocjenjivanje postojećih AB građevina prije i nakon pojačavanja posmičnim zidovima

Autori:



Doc.dr.sc. **Onur Onat**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Munzur, Tunceli, Turska
Tehnički fakultet
Odjel za građevinarstvo
onuronat@munzur.edu.tr



Izv.prof.dr.sc. **Burak Yön**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Munzur, Tunceli, Turska
Tehnički fakultet
Odjel za građevinarstvo
burakyon@gmail.com



Prof.dr.sc. **Yusuf Calayiri**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Fırat, Elazığ, Turska
Tehnički fakultet
Odjel za građevinarstvo
ycalayir@firat.edu.tr

Stručni rad

Onur Onat, Burak Yön, Yusuf Calayır

Seizmičko ocjenjivanje postojećih AB građevina prije i nakon pojačavanja posmičnim zidovima

U ovom se radu ocjenjuju postojeće armiranobetonske (AB) građevine prije i nakon pojačavanja posmičnim zidovima. Za potrebe numeričkog proračuna odabrana je postojeća AB građevina koja je zatim pojačana pomoću posmičnih zidova. Provedene su inkrementalne dinamičke analize i analize postupnim guranjem (pushover analiza), a za to je primijenjena metoda raspoređenog plastičnog zgloba. Prema dobivenim rezultatima, seizmičkim pojačanjem pomoću posmičnih zidova ne samo da se poboljšava krutost i nosivost građevina već se i smanjuju bočni pomaci i oštećenja.

Ključne riječi:

analiza konstrukcije, oštećenje, pojačanje, posmični zid, armiranobetonske građevine

Professional paper

Onur Onat, Burak Yön, Yusuf Calayır

Seismic assessment of existing RC buildings before and after shear-wall retrofitting

The existing reinforced concrete (RC) buildings are analysed in the paper before and after shear-wall retrofitting. For numerical application, an existing RC building was selected and retrofitted with shear walls. Incremental dynamic analyses and static pushover analysis of these buildings were performed using the distributed plastic hinge approach. The results show that seismic retrofitting with shear walls increases rigidity and capacity of the building, while decreasing lateral displacements and damage.

Key words:

structural analysis, damage, retrofitting, shear wall, reinforced concrete buildings

Fachbericht

Onur Onat, Burak Yön, Yusuf Calayır

Seismische Bewertung der bestehenden Stahlbetongebäude vor und nach Verstärkung durch Schiebewände

In dieser Abhandlung werden die bestehenden Stahlbetongebäude vor und nach Verstärkung durch Schiebewände bewertet. Für die Zwecke der numerischen Berechnung wurde ein bestehendes Stahlbetongebäude ausgewählt, das dann mithilfe von Schiebewänden verstärkt wurde. Durchgeführt wurden inkrementelle dynamische Analysen und Analysen durch schrittweises Schieben (Pushover-Methode), und dafür wurde die Methode des verteilten Plastikgelenks angewendet. Nach den erhaltenen Ergebnissen wird durch die seismische Verstärkung mithilfe von Schiebewänden nicht nur die Steifigkeit und Tragfähigkeit der Gebäude verbessert, sondern es werden auch seitliche Verschiebungen und Beschädigungen verringert.

Schlüsselwörter:

Analyse der Konstruktion, Beschädigung, Verstärkung, Schiebewand, Stahlbetongebäude

1. Uvod

Potres se smatra najsnažnijim vanjskim utjecajem na građevine. Odziv AB građevina na djelovanje potresa ovisi o brojnim parametrima. Na seizmičko ponašanje građevina, kao i na razinu njihovog oštećenja bitno utječu parametri kao što su težina građevine, svojstva tla u području u kojem se nalazi građevina, razmještaj i veličina konstrukcijskih elemenata, arhitektonski detalji i kvaliteta materijala [1, 2]. Nosivost AB građevina treba se povećati prije ili nakon potresa kako bi se postigla potrebna razina sigurnosti. Postupci seizmičkog pojačanja koji se danas najčešće primjenjuju uključuju dodavanje posmičnih zidova, primjenu vanjskih obloga za AB stupove te oblaganje područja plastičnog zgloba na stupu pomoću čeličnih ploča pričvršćenih na AB konstrukciju [3]. Međutim, odabir odgovarajuće metode javlja se kao problem. Kako bi se smanjilo oštećenje građevine, trebaju se usvojiti odgovarajuće metode poboljšanja te se treba ocijeniti njihov seizmički odziv. Ovdje je osnovno pitanje kako prilagoditi mjere poboljšanja samim građevinama, jer će postupci pojačanja zapravo definirati ponašanje konstrukcije tijekom budućeg potresa. Zbog toga se mjere pojačanja tj. poboljšanja trebaju pravilno definirati i prikladno provoditi [4]. Jedna od najznačajnijih metoda za pojačanje AB građevina jest dodavanje AB posmičnog zida građevini koja se želi pojačati. Takvim AB posmičnim zidovima uvelike se povećava čvrstoća visokih građevina, ali i njihova otpornost na bočne sile kao što su potres i opterećenje vjetrom [5]. Osim vertikalnog opterećenja, usporedno s visinom građevine raste i horizontalno opterećenje. Zbog djelovanja horizontalnog opterećenja stupovi i grede AB građevine podvrgnuti su velikim momentima savijanja, posmičnim naprezanjima i momentima drugog reda u zonama koje su osjetljivije na potres, pri čemu jačina tih utjecaja ovisi o visini građevine. Zbog toga horizontalni pomaci duž visine građevine dosežu neočekivane razine. Kako bi se ograničio horizontalni pomak koji dovodi do rasta momenata drugog reda, umjesto konvencionalnih stupova trebaju se koristiti AB posmični zidovi visoke krutosti na savijanje. Osnovni zadatak AB posmičnog zida sastoji se u ograničavanju horizontalnih pomaka između katova povećanjem horizontalne krutosti na reverzibilno ciklično seizmičko opterećenje. Ponašanje tih elemenata treba se ocijeniti numerički kako bi se djelotvorno povezali s AB okvirom radi sprječavanja oštećenja nekonstrukcijskih elemenata. To se ocjenjivanje treba obaviti tijekom građenja novih građevina ali također i u sklopu pojačanja postojećih konstrukcija kako bi se povećao stupanj njihove sigurnosti. Za ocjenjivanje nelinearnog seizmičkog odziva AB građevina treba se koristiti metoda kojom se može ustanoviti ponašanje građevine u rasponu od linearno elastičnog područja pa sve do područja njenog popuštanja ili rušenja. Kod sustava s više stupnjeva slobode, pri određivanju nelinearnog odziva mogu se javiti poteškoće upravo zbog utjecaja viših modova. Za provjeru nelinearnog odziva građevina obično se koristi inkrementalna dinamička analiza (IDA). Prema toj se metodi predlaže niz zapisa

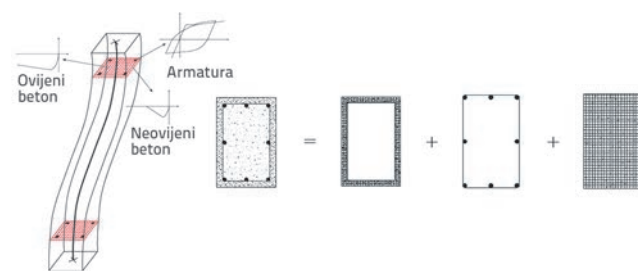
o ubrzanju pomaka tla te se izvodi odabir i uvrštavanje u više područje intenziteta kako bi se pokrio čitav spektar ponašanja konstrukcije, od elastičnog odziva do globalne dinamičke nestabilnosti [6-11].

Međutim, za određivanje ponašanja građevine primjenjuje se metoda poznata kao nelinearna statička metoda postupnog guranja. Radi se o praktičnom postupku za ocjenjivanje otpornosti građevine u postelastičnom području. Krivulja nosivosti građevine pokazuje odnos između osnovne posmične sile i pomaka krova. Kako bi se definirale krivulje nosivosti, bočne se sile proporcionalno povećavaju sve dok se ne ostvari određena razina pomaka na vrhu građevine [12-16].

U ovom se istraživanju metoda IDA i metoda postupnog guranja primjenjuje za ocjenjivanje seizmičkog odziva postojećih armiranobetonskih građevina prije i nakon povećanja otpornosti na seizmičke utjecaje. Ovdje se također prikazuje i model raspoređenog plastičnog zgloba koji se koristi za nelinearno modeliranje konstrukcijskih elemenata.

2. Primjena modela plastičnog zgloba u nelinearnom modeliranju

Ovaj je model definiran kao model vlaknastih elemenata, a uglavnom se odnosi na pitanje plastičnosti. Plastičnost je raspoređena po čitavom poprečnom presjeku i po dužini elementa. U ovom modelu zglobnog ponašanja konstrukcijski se element dijeli na tri vrste vlakana. Prva se vlakna koriste za modeliranje uzdužne armature, druga za određivanje nelinearnog ponašanja ovijenog betona, a preostala se vlakna koriste za određivanje neovijenog betona, što uključuje i pokrivni beton. Osim toga, područje naprezanja i deformacija određeno je za svako vlakno u nelinearnom području na temelju konstitutivnih zakonitosti za definirane materijale. Tipično modeliranje vlakana za pravokutni armiranobetonski presjek prikazano je na slici 1.



Slika 1. Tipični model vlakana AB elementa [17]

U svojim studijama istraživači koriste model raspoređenog plastičnog zgloba jer je model takvog zglobnog ponašanja točniji od modela koncentriranog zgloba, naročito u slučaju velikih varijacija aksijalnih sila [18]. U svojoj dinamičkoj analizi građevina, Dides i Llera usporedili su modele plastičnosti – uključujući i vlaknasti zglobni model [19]. Duan i Hueste istraživali su seizmičko ponašanje petokatne

armiranobetonske građevine projektirane u skladu sa zahtjevima kineskog zakona o protupotresnoj zaštiti. Oni su u svojim analizama koristili model raspoređenog zglobnog djelovanja [20]. Kadid i dr. istraživali su ponašanje armiranobetonskih građevina pri istovremenim pomacima tla i pritom su koristili pristup vlaknastog zglobnog djelovanja [21]. Mwafy je istraživao faktore koji utječu na seizmičko ponašanje betonskih građevina. U njegovoj je studiji definirano pet mjerodavnih građevina visine od 20 do 60 katova. Analiza tih građevina provedena je u skladu s pristupom vlaknastog zglobnog djelovanja [22]. Carvalho i dr. usporedili su razne modele zglobnog djelovanja na armiranobetonsku građevinu i pritom su se koristili metodom postupnog guranja i proračunom odziva u vremenu [23]. Beigi i dr. ocijenili su stupanj seizmičkog poboljšanja mekog okvira pomoću novog sustava s kosim razmaknutim ukrutama (engl. *gapped-inclined brace* - GIB). Oni su u nelinearnom statičkom proračunu koristili pristup vlaknastog zglobnog djelovanja [24]. Yön i Calayir ocijenili su utjecaj tla na seizmički odziv AB građevina i pritom su koristili model raspoređenog zglobnog djelovanja [25]. Yön i dr. izradili su studiju o utjecaju seizmičkih zona i lokalnih uvjeta na seizmički odziv AB građevina [26]. Chaulagain i dr. istraživali su rješenja za seizmičko poboljšanje postojećih niskih AB građevina u Nepal, te su ocijenili seizmičku otpornost postojećih građevina s ispunskim zidom u Nepal. U analizama je pretpostavljeno da je polovica većih dimenzija poprečnog presjeka jednaka dužini plastičnog zgloba s diskretizacijom vlakana [27, 28]. Sadraddin je analizirao vjerojatnost oštećenja višekatnih armiranobetonskih građevina nakon dodavanja posmičnih zidova. Metoda vlakana korištena je za modeliranje poprečnih presjeka elemenata građevine [29]. Khaloo i dr. istraživali su utjecaj limitiranja seizmičkih zapisa na krivulje vjerojatnosti oštećenja armiranobetonskih okvira s raznim indeksima oštećenja. Oni su u nelinearnim proračunima koristili pristup vlaknastog zglobnog djelovanja [30].

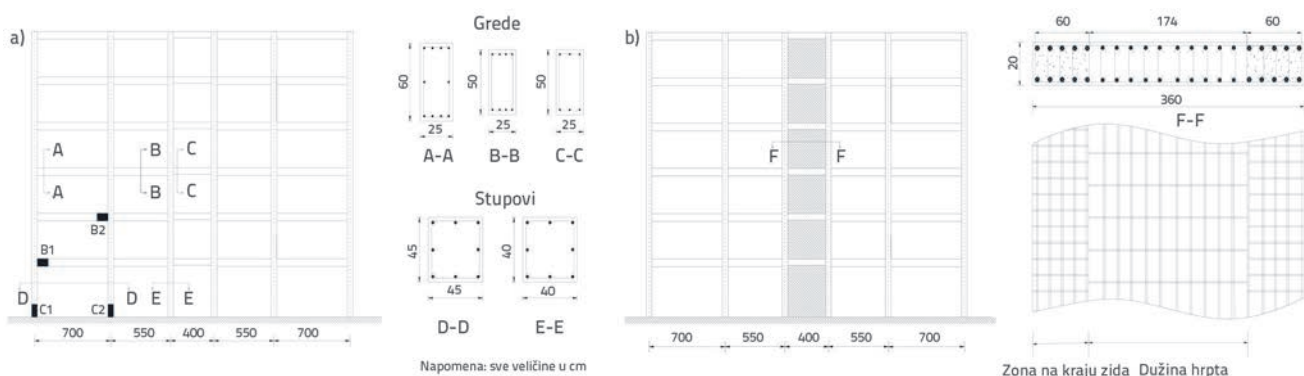
U ovom se radu pristup vlaknastog zglobnog djelovanja koristi za ocjenjivanje postojećih armiranobetonskih građevina prije i nakon poboljšanja otpornosti na seizmička djelovanja.

3. Numerička analiza

3.1. Opis građevine, usvojenih modela, materijala i svojstava

Za provođenje numeričkog ispitivanja odabran je postojeći šestokatni, petokrilni armiranobetonski okvir. Model je pojačan posmičnim zidovima. Stupovi nisu pojačani vanjskom oblogom. Modeli su prikazani na slici 2. Ukupna visina građevina iznosi 22 m. Za odabranu građevinu, visina prizemlja iznosila je 4,5 m, a gornjih katova 3,5 m. Za postojeću građevinu, dimenzije stupova su 45/45 i 40/40 cm, a greda 25/60 i 25/50 cm. Debljina ploče je 12 cm. Nelinearna dinamička analiza građevina provedena je primjenom raznih ubrzanja tla (od 0,1g do 0,4g) za tlo klase Z3 prema turskom zakonu o protupotresnoj zaštiti (TSC) [31]. Uzeto je da koeficijent značaja građevine iznosi 1,0, karakteristična čvrstoća betona je 14 MPa, a granica popuštanja rebraste armature 220 MPa za postojeću građevinu. Tlačna čvrstoća većine postojećih građevina u Turskoj, naročito onih koje su izvedene prije 2000. godine, iznosi manje od 20 MPa. Stoga je ta vrijednost tlačne čvrstoće uzeta u obzir u našem slučaju. Osim toga, za posmične zidove učvršćene građevine odabrana je tlačna čvrstoća betona od 25 MPa te granica popuštanja rebraste armature od 420 MPa. Što se tiče rubnih uvjeta, pretpostavljeno je da je građevina upeta u tlo. U obzir nisu uzete razlike tla i svojstva prigušenja. Za nelinearnu analizu korišten je program SeismoStruct [32] jer se pomoću njega može simulirati odziv neelastičnih konstrukcijskih sustava u slučaju dinamičkog i statičkog opterećenja. Programi SeismoArtif [33] i Seismosignal [34] korišteni su za usklađivanje vremenskih serija potresa sa spektrima za projektiranje.

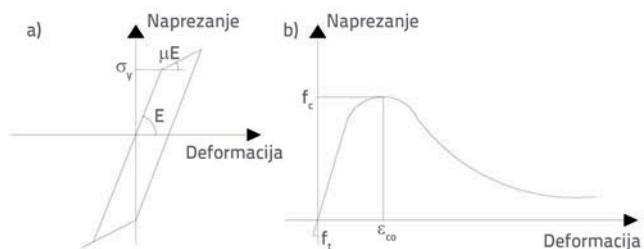
Za armature šipke korišten je bilinearni elastoplastični model materijala. Materijal za beton definiran je pomoću modela betona s jednoosnim učvršćenjem (slika 3.). Utjecaj učvršćenja izračunan je pomoću Manderovog modela [35]. Parametri koji se odnose na konstrukcijske elemente postojećih i pojačanih građevina prikazani su u tablici 1.



Slika 2. a) Postojeća građevina s konstrukcijskim elementima; b) pojačane građevine s konstrukcijskim elementima

Tablica 1. Parametri armiranog betona za konstrukcijske elemente

Modeli	Konstrukcijski elementi		Uzdužna armatura	Presjek	Razmak poprečne armature [cm]
Pojačana građevina	Posmični zid (20/360 cm)	Zona na kraju zida	20Ø14	F-F	10
		Duljina hrpta	20Ø14		20
Postojeća građevina	Stup (45/45 i 40/40 cm)	Zona učvršćenja stupa	8Ø16	D-D	15
		Središnja zona stupa		E-E	20
	Greda (25/60 cm)	Zona učvršćenja grede	Armatura na vrhu 4Ø12	A-A	20
		Središnja zona grede	Armatura na dnu 4Ø12		
	Greda (25/50 cm)	Zona učvršćenja grede	Armatura na vrhu 4Ø12	B-B	20
		Središnja zona grede	Armatura na dnu 4Ø12		
	Greda (25/50 cm)	Zona učvršćenja grede	Armatura na vrhu 3Ø12	C-C	20
		Središnja zona grede	Armatura na dnu 3Ø12		

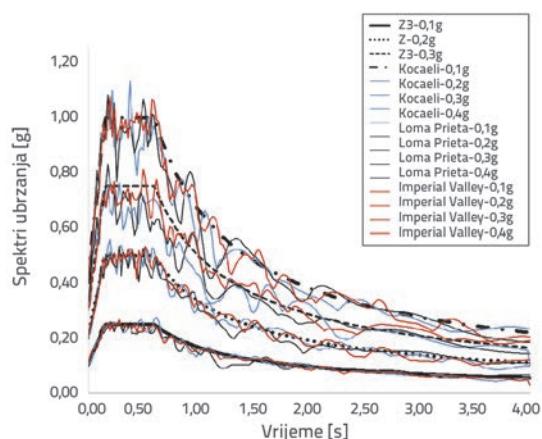


Slika 3. Modeli materijala: a) Bilinearni elastoplastični materijal za armaturu; b) Mander-ov [35] model za beton

3.2. Parametri potresa, lokalni uvjeti i kriteriji učinka

Odabrane vremenske serije potresa prikazane su u tablici 2. Seizmički zapisi preuzeti su iz PEER baze podataka [36]. Frekvencijsko područje tih zapisa podešeno je prema spektru projektiranja u skladu s različitim ubrzanjima tla i klasom tla Z3 prema TSC-u. Na slici 4. prikazani su prilagođeni spektri usklađeni s ciljnim spektrom za projektiranje na bazi raznih ubrzanja tla te za klasu tla Z3. Prema zakonu TSC 2007, klasa Z3 dijeli se na dvije skupine (C i D) prema debljini najgornjeg sloja tla. Ta debljina varira od 15 do 50 m za skupinu C te iznosi manje od 10 m za skupinu D. Skupina C uglavnom se

sastoji od vrlo rastrošenih mekih metamorfnih stijena i vezanih sedimentnih stijena s plohom diskontinuiteta, pijeska i šljunka srednje zbijenosti, te od polučvrste do prašinate gline. Skupina D uglavnom se sastoji od dubokih mekih aluvijalnih slojeva s visokom razinom podzemne vode, nevezanog pijeska, meke gline i prašinate gline.



Slika 4. Spektri odziva pripadaju odabranim vremenskim serijama ubrzanja prilagođenim elastičnom proračunskom spektru za tlo klase Z3 i za razne pomake tla

Tablica 2. Seizmički zapisi za nelinearnu dinamičku analizu

Potresi	Godina	Lokacija	Usmjerenje	Magnituda	PGA [cm/s ²]
Imperial Valley	1940.	El Centro Array	Istok-zapad	7,0	307,05
Loma Prieta	1989.	Corralitos	Istok-zapad	6,9	631,76
Kocaeli	1999.	Kocaeli	Sjever-jug	7,4	373,76

PGA - maksimalna horizontalna akceleracija tla (eng. Peak Ground Acceleration)

Tablica 3. Kriteriji učinka korišteni u analizama

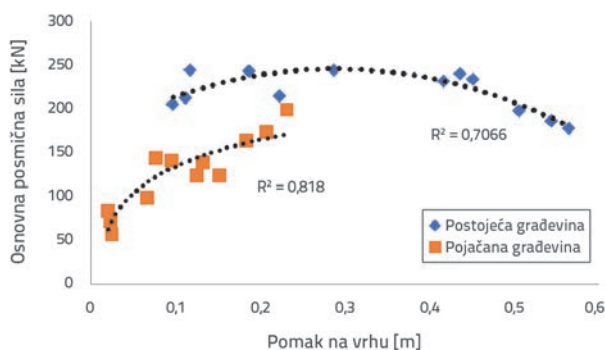
Razina oštećenja	Granične vrijednosti za ovijeni beton	Granične vrijednosti za neovijeni beton	Granične vrijednosti za armaturu
Granica minimalnog oštećenja (MN)	$(\varepsilon_{cu})_{MN} = 0,0035$	0,0035	$(\varepsilon_s)_{MN} = 0,010$
Granica sigurnog oštećenja (GV)	$(\varepsilon_{cg})_{GV} = 0,0035 + 0,01(\rho_s/\rho_{sm}) \leq 0,0135$	0,0037	$(\varepsilon_s)_{GV} = 0,040$
Granica oštećenja pri rušenju (GC)	$(\varepsilon_{cg})_{GC} = 0,004 + 0,014(\rho_s/\rho_{sm}) \leq 0,018$	0,0040	$(\varepsilon_s)_{GC} = 0,060$

U TSC-u se kriteriji učinka koriste kao osnovni kriteriji. Prema TSC-u, za seizmičku su ocjenu definirane tri razine učinka. Prva razina učinka je granica minimalnog oštećenja (MN) [neposredna nastanjivost – IO], druga razina učinka je granica sigurnog oštećenja (GV) [zaštita života – LS], a treća razina učinka je granica oštećenja pri rušenju (GC) [sprečavanje rušenja – CP]. Te su granice učinka prikazane u tablici 3.

U tablici 3. vrijednosti ε_{cu} , ε_{cg} i ε_s predstavljaju redom: graničnu deformaciju neovijenog betona, graničnu deformaciju ovijenog betona i deformaciju armature. Isto tako, vrijednost ρ_s označava mehanički koeficijent armiranja spiralnom armaturom u poprečnom presjeku, a vrijednost ρ_{sm} označava mehanički koeficijent armiranja poprečnom armaturom u poprečnom presjeku.

4. Rezultati analize

Apsolutni maksimalni odzivi dobiveni su na temelju prilagođenih zapisa, a pritom je korištena analiza IDA. Maksimalni odzivi prilagođeni su kako bi se dobile krivulje dinamičkog proračuna. Ti odzivi i krivulje dinamičkog proračuna prikazani su na slici 5. za postojeću i pojačanu građevinu.



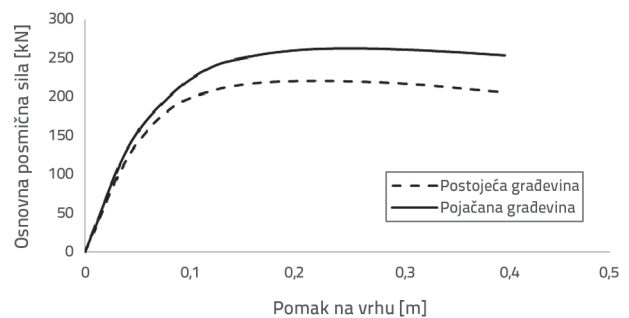
Slika 5. Usporedba maksimalnih odziva i krivulja dinamičkog proračuna građevina

Antoniou i Pinho predložili su postupak za dobivanje apsolutnih maksimalnih pomaka na temelju rezultata dinamičke analize. Prema toj preporuci, vrijednosti dobivene dinamičkom analizom iskazane su prikazivanjem apsolutnog maksimalnog pomaka

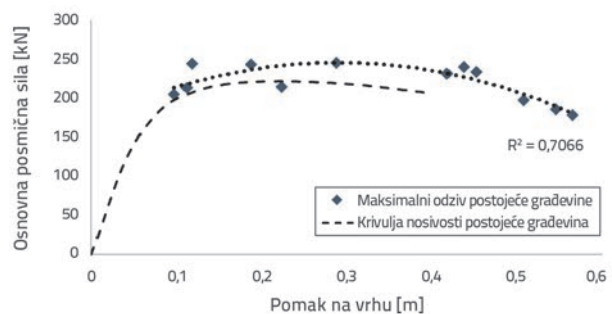
i odgovarajuće poprečne sile prizemlja (tj. vršne poprečne sile u intervalu od $\pm 0,5$ s maksimalnog pomaka) [37]. Anvelope vrijednosti u dinamičkoj analizi određene su uzimajući u obzir tu situaciju. Iz slike se može vidjeti da su pomaci i posmične sile postojeće građevine veći od odgovarajućih vrijednosti pojačane zgrade. Posmičnim zidovima poboljšane zgrade ograničavaju se pomaci i građevina se dodatno ukrućuje.

Krivulje nosivosti dviju uspoređenih građevina prikazane su na slici 6. Na toj slici se vidi da je otpornost na poprečne sile prizemlja pojačane građevine veća od otpornosti na poprečne sile prizemlja postojeće građevine. Također se može zamijetiti koliko posmični zidovi (kao konvencionalno rješenje) doprinose nosivosti građevine.

Usporedba krivulje nosivosti postojeće građevine i maksimalnih odziva pomoću IDA-e sa statičnim krivuljama postupnog guranja prikazana je na slici 7.

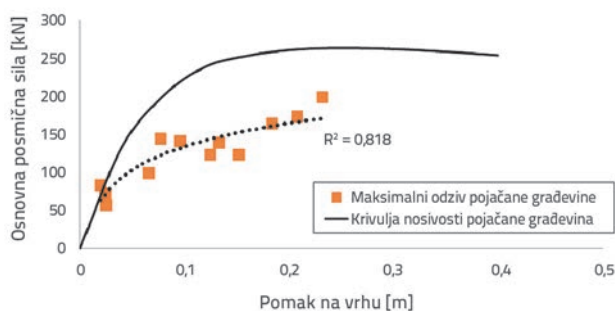


Slika 6. Usporedba krivulja nosivosti građevina



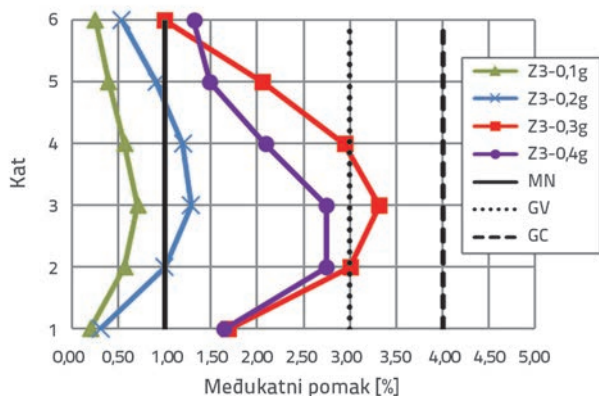
Slika 7. Usporedba odziva krivulje nosivosti i maksimalnih odziva s krivuljom dinamičkog proračuna za postojeću građevinu

Na slici 7. se vidi da su odzivi postojeće građevine tijekom niskoamplitudnih maksimalnih odziva bliski vrijednostima koje su iskazane na krivulji nosivosti građevine. Odzivi dobiveni na temelju visokih ubrzanja tla upućuju na veći pomak i manju poprečnu silu prizemlja, dok su ostali odzivi veći od onih iskazanih na krivulji nosivosti. Ova situacija pokazuje da velike vrijednosti ubrzanja tla uzrokuju rušenje postojeće građevine. Usporedba krivulje nosivosti pojačane građevine i maksimalnih odziva prema analizi IDA prikazana je na slici 8. Može se uočiti da su odzivi pojačane građevine suviše blizu i ispod krivulja nosivosti za niske vrijednosti ubrzanja tla. Međutim, odzivi dobiveni na temelju visokih vrijednosti ubrzanja tla ne prelaze krivulju nosivosti građevine. Ta nam situacija pokazuje da dodatni posmični zid doprinosi nosivosti građevine.

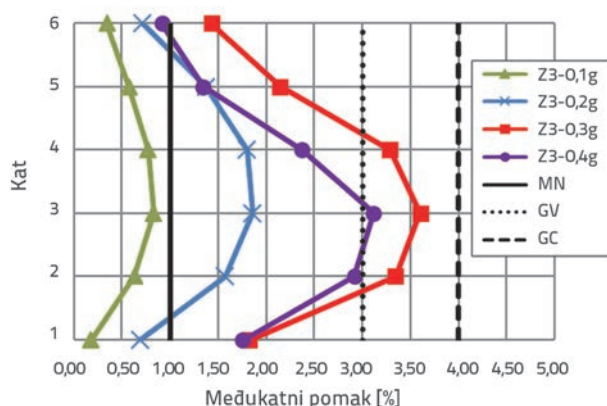


Slika 8. Usporedba krivulje nosivosti i maksimalnih odziva s krivuljom dinamičkog proračuna za pojačanu građevinu

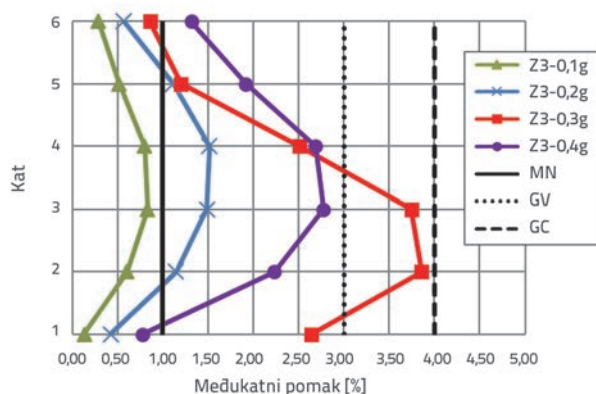
Na slikama 9. do 11. pokazani su međukatni pomaci iskazani na bazi potresa Imperial Valley, Loma Prieta i Kocaeli prilagođenih za postojeću građevinu. Prema potresima Imperial Valley i Kocaeli, maksimalni koeficijenti međukatnog pomaka izvedeni su za kategoriju tla Z3 pri 0,3 g. Razine međukatnog pomaka bile su veće od razine učinka GV (granica sigurnog oštećenja). Međukatni pomaci bili su ispod razine učinka za klasu tla Z3 kod drugih vrijednosti pomaka tla. Za potres Loma Prieta, međukatni pomaci bili su veći od razine učinka GV za Z3 0,3 g i za Z3 0,4 g.



Slika 9. Međukatni pomak prema potresu Imperial Valley prilagođenim za postojeću građevinu

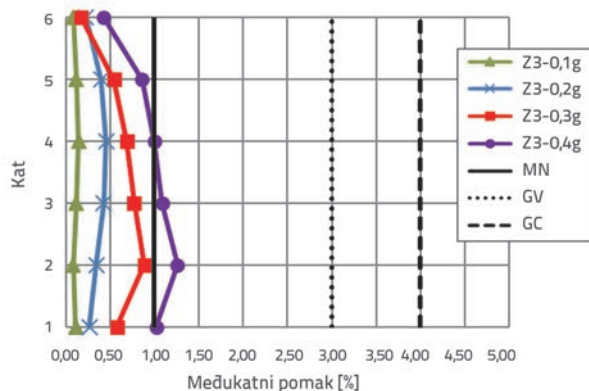


Slika 10. Međukatni pomak prema potresu Loma Prieta prilagođenim za postojeću građevinu

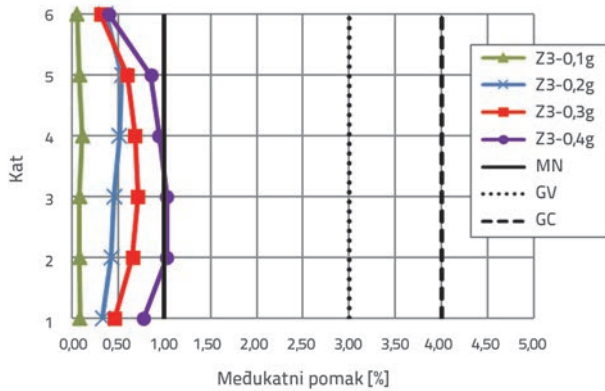


Slika 11. Međukatni pomak prema potresu Kocaeli prilagođenim za postojeću građevinu

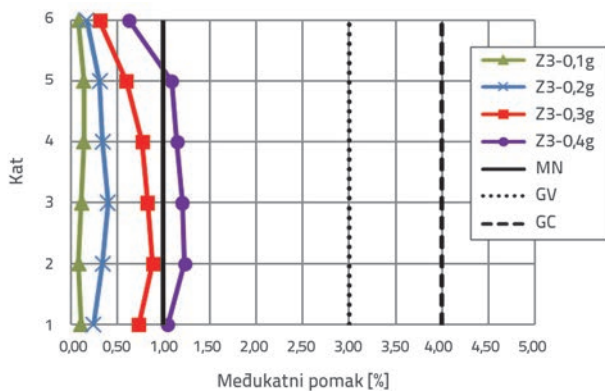
Međukatni su pomaci prikazani na slikama 12. do 14. za pojačanu građevinu na bazi prilagođenih potresa Imperial Valley, Loma Prieta i Kocaeli. Prema tim prilagođenim potresima, maksimalni koeficijenti međukatnog pomaka izvedeni su za klasu tla Z3 pri 0,4 g. Registrirane razine međukatnog pomaka nisu prelazile razinu učinka MN (granica minimalnog oštećenja) kod prilagođenih potresa, osim kod Z3 – 0,4g.



Slika 12. Međukatni pomak prema potresu Imperial Valley prilagođenim za pojačanu građevinu

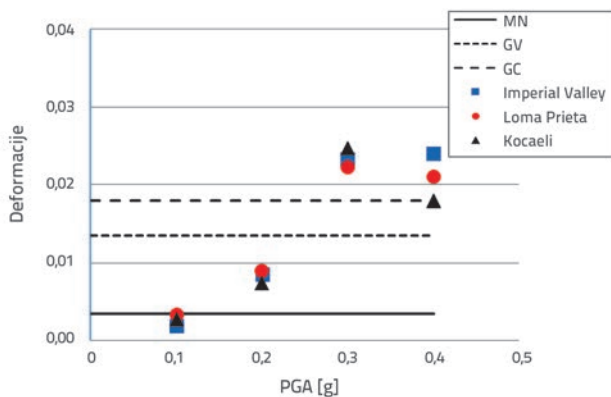


Slika 13. Međukatni pomak prema potresu Loma Prieta prilagođenim za pojačanu građevinu

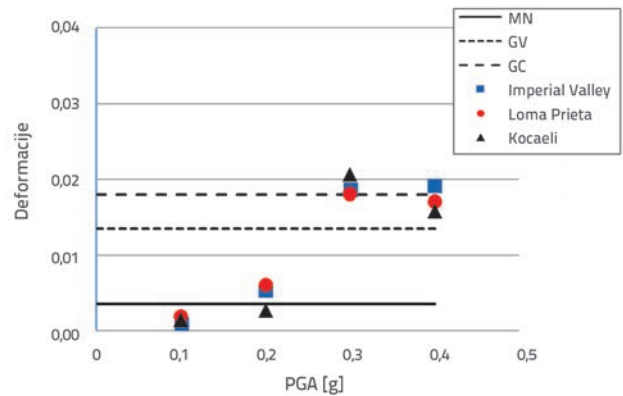


Slika 14. Međukatni pomak prema potresu Kocaeli prilagođenim za pojačanu građevinu

Razine oštećenja iskazane su prema razinama deformacija koje su definirane za ovijeni beton u TSC. Na slikama 15. i 16. prikazana je šteta na donjim dijelovima stupova C1 i C2 postojeće građevine. Na tim se slikama jasno vidi da su deformacije pri ubrzanjima tla od 0,3 g i 0,4 g za klasu tla Z3 veće od granice oštećenja pri rušenju (GC) na donjem kraju tih ovijenih betonskih stupova. Međutim, deformacije registrirane pri ubrzanju tla koje je manje od 0,2 g ne mogu udovoljiti zahtjevima granice sigurnog oštećenja (GV). Pri ubrzanju tla od 0,1 g, deformacije ne prelaze granicu minimalnog oštećenja (MN) za ovijeni beton.

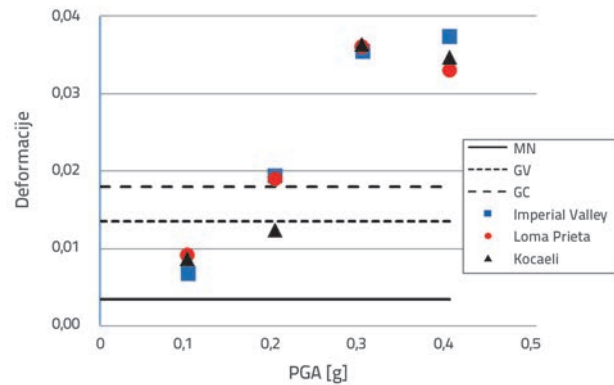


Slika 15. Oštećenje postojeće građevine na donjem kraju stupa C1 za razne potrese

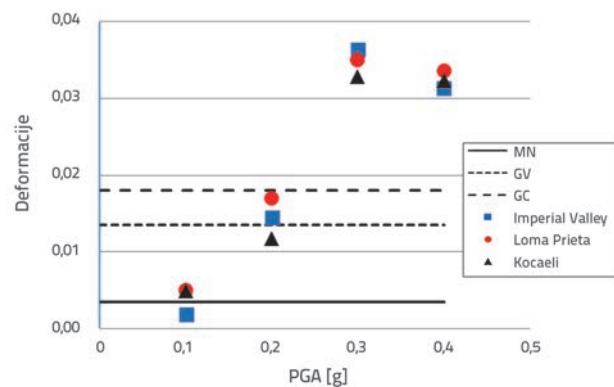


Slika 16. Oštećenje postojeće građevine na donjem kraju stupa C2 za razne potrese

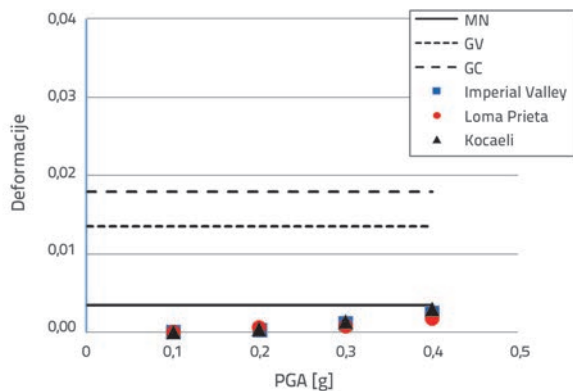
Na slikama 17. i 18. prikazane su razine oštećenja ovijenog betona postojeće građevine na lijevom kraju grede B1 i na desnom kraju grede B2. Na tim slikama možemo uočiti da su za ovijeni beton deformacije dobivene na krajevima odabranih greda pri ubrzanju tla od 0,3 g i 0,4 g znatno iznad granice oštećenja pri rušenju (GC). Međutim, deformacije do kojih je došlo pri ubrzanju tla od 0,2 g veće su od granice sigurnog oštećenja (GV), osim kod prilagođenog potresa Loma Prieta. Kod ubrzanja tla od 0,1 g, oštećenje zabilježeno za ovijeni beton veće je od granice minimalnog oštećenja (MN) osim kod prilagođenog potresa Imperial Valley.



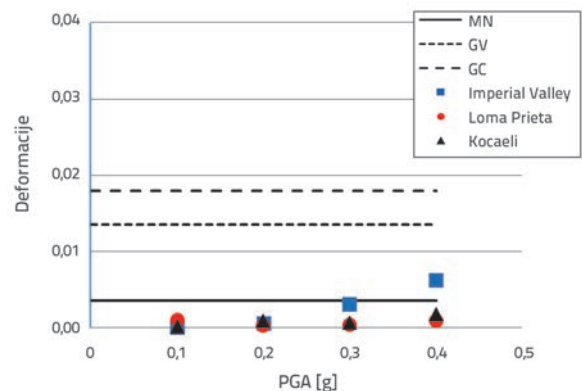
Slika 17. Oštećenje postojeće građevine na lijevom kraju grede B1 za razne potrese



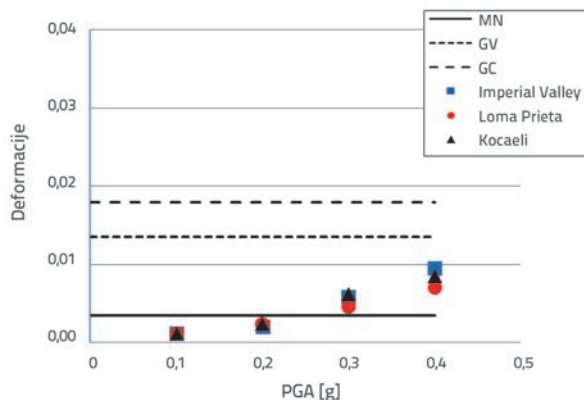
Slika 18. Oštećenje postojeće građevine na desnom kraju grede B2 za razne potrese



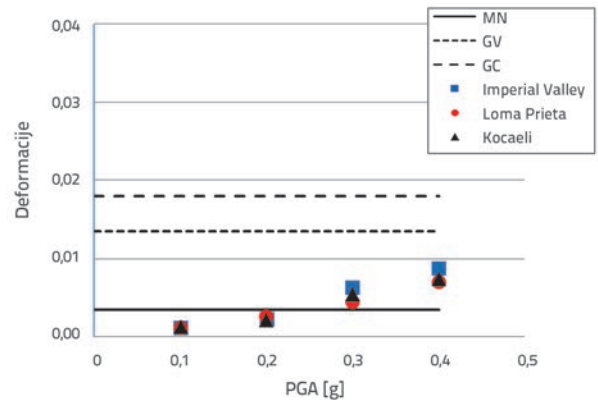
Slika 19. Oštećenje pojačane građevine na donjem kraju stupa C1 za razne potrese



Slika 20. Oštećenje pojačane građevine na donjem kraju stupa C2 za razne potrese



Slika 21. Oštećenje pojačane građevine na lijevom kraju grede B1 za razne potrese



Slika 22. Oštećenje pojačane građevine na desnom kraju grede B2 za razne potrese

Oštećenje ovijenog betona na donjem kraju stupova C1 i C2 pojačane građevine prikazano je na slikama 19. i 20. Prema tim slikama, oštećenje ostaje ispod granice oštećenja MN na donjem kraju tih stupova, osim kod stupa C2 pri potresu Imperial Valley od 0,4 g. Što se tiče analiziranih greda, zabilježena šteta odgovara onoj koja je registrirana kod stupova. Međutim, deformacije ostaju ispod razine učinka GV, ali su veće od razine učinka MN kod odabranih potresa za ubrzanja tla od 0,3 g i 0,4 g. Ta je situacija prikazana na slikama 21. i 22.

5. Zaključak

U ovom se radu istražuje seizmičko ponašanje postojećih armiranobetonskih građevina prije i nakon seizmičkog pojačavanja. Odabrana je postojeća armiranobetonska građevina koja je zatim pojačana posmičnim zidovima. Za tu je građevinu u oba slučaja provedena inkrementalna dinamička analiza i statička metoda postupnog guranja i za to je korišten pristup raspoređenog plastičnog zgloba. Za potrebe nelinearne dinamičke analize odabrane su tri vremenske serije seizmičkog ubrzanja koje su zatim usklađene sa spektrom za projektiranje prema turskom zakonu o protupotresnoj zaštiti. Definirani su i grafički prikazani maksimalni odzivi i krivulje nosivosti postojeće i pojačane građevine. Definirane su i krivulje dinamičkog

proračuna i pritom su korištene vrijednosti maksimalnih odziva. Međukatni pomaci i oštećenja odabranih elemenata građevina određeni su na bazi postojećeg zakona. Na temelju dobivenih rezultata može se zaključiti sljedeće:

- Krivulja nosivosti pojačane građevine veća je od odgovarajuće krivulje postojeće građevine. To pokazuje da posmični zid povećava nosivost građevine.
- Kod postojeće građevine odzivi su postojeće konstrukcije tijekom niskoamplitudnih pomaka tla bliski krivulji nosivosti istog modela. Međutim, odzivi dobiveni pri višim ubrzanjima tla omogućuju veći pomak i nižu poprečnu silu prizemlja. To pokazuje da visoke vrijednosti seizmičke pobude dovode do rušenja nepojačane građevine.
- Kod pojačane građevine odzivi su konstrukcije dobiveni tijekom dinamičke analize suviše blizu jedni drugima. Osim toga, vrijednosti krivulje nosivosti i seizmičkog odziva konstrukcije gotovo su iste pri seizmičkim pomacima niske magnitude. Međutim, odzivi dobiveni kod seizmičkih pomaka visoke amplitude ne prelaze krivulju nosivosti poboljšane zgrade. To upućuje na doprinos posmičnog zida nosivosti građevine isto kao i na njegov doprinos faktoru prigušenja čitavog sustava.
- Međukatni pomaci dobiveni za klasu tla Z3 pri ubrzanju tla od 0,3 g prelaze kod postojeće građevine granicu sigurnog

- oštećenja (GV) za potrese Imperial Valley i Kocaeli. Međutim, međukatni pomaci za Z3 - 0,3 g i Z3 - 0,4 g prelaze razinu učinka GV za potres Loma Prieta.
- Kako su svi rezultati analiza razmatrani u odnosu na pojačanu građevinu, treba napomenuti da su maksimalni koeficijenti međukatnog pomaka dobiveni za klasu tla Z3 pri ubrzanju od 0,4 g. Registrirane razine međukatnog pomaka nisu prelazile razinu učinka MN osim kod Z3 - 0,4 g.
 - Deformacije zabilježene kod ubrzanja tla od 0,3 g i 0,4 g prelazile su granicu oštećenja pri rušenju (GC) za ovijeni beton na donjem kraju odabranih stupova postojeće građevine. Osim toga, deformacije koje su se javile pri ubrzanju tla od 0,2 g nisu udovoljavale granici sigurnog oštećenja (GV), dok deformacije ne prelaze granicu minimalnog oštećenja (MN) za ovijeni beton pri ubrzanju tla od 0,1 g. Što se tiče razine oštećenja ovijenog betona na kraju odabranih greda postojeće građevine, deformacije dobivene za ubrzanja tla od 0,3 g i 0,4 g uvelike su prelazile granicu oštećenja pri rušenju (GC) za beton jezgre.

- Šteta na ovijenom betonu na donjem kraju tih stupova bila je unutar granice minimalnog oštećenja (MN) za sve zapise na kraju odabranih stupova, osim kod potresa Imperial Valley pri 0,4 g za stup C2 pojačane građevine. Što se tiče analiziranih greda, registrirano oštećenje odgovara oštećenju odabranih stupova. Međutim, deformacije ostaju ispod razine učinka GV, dok deformacije prelaze razinu učinka MN kod odabranih potresa prilagođenih za ubrzanja tla od 0,3 g i 0,4 g.

Zaključno se može ustvrditi da su dodatni posmični zidovi doveli do povećanja krutosti i nosivosti građevine, smanjili bočni pomak te umanjili štetu, što je rezultat dobro promišljenog i ispravno provedenog postupka njihove izrade. Ova detaljna istraživanja čine osnovu za izradu niza dinamičkih analiza te za usporedbu sa statičkim krivuljama postupnog guranja, što bi trebalo pridonijeti povećanju razine pouzdanosti u ocjenjivanju postojećih armiranobetonskih građevina prije i nakon pojačanja.

LITERATURA

- [1] Bayülke, N.: Repair and strengthening of damaged structures in earthquakes, TMMOB İzmir Chamber of Civil Engineers, pp.1-150 (in Turkish), 1999.
- [2] Altun, F., Kara, H.B., Uncuoğlu, E., Karahan, O.: Earthquake Damages in Reinforced-Concrete Structures and Retrofitting Work On a 6 Storey Building, Gazi University Journal of Science, 16 (2003) 2, pp. 309-318 (in Turkish).
- [3] Hueste, M.B.D., Bai, J.W.: Seismic retrofit of a reinforced concrete flat-slab structure: Part I-seismic performance evaluation. *Engineering Structures*, 29 (2007) 6, pp. 1165-1177.
- [4] Altay, G., Deodatis, G., Franco, G., Gülkan, P., Kunreuther, H., Luş, H., Mete, E., Seeber, N., Smyth, A., Yüzüğüllü, O.: Benefit-Cost Analysis for Earthquake Mitigation: Evaluating Measures for Apartment Houses in Turkey, Second Annual IIASA-DPRI Meeting, Istanbul, 2002.
- [5] Wang, Q., Wang, L., Liu, Q.: Effect of shear wall height on earthquake response. *Engineering structures*, 23 (2001) 4, pp. 376-384.
- [6] Vamvatsikos, D., Cornell, C.A.: Incremental dynamic analysis, *Earthquakes Engineering and Structural Dynamics*, 31 (2002), pp. 491-514, <https://doi.org/10.1002/eqe.141>
- [7] Dolsek, M., Fajfar, P.: Simplified non-linear seismic analysis of infilled reinforced concrete frames. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34 (2005), pp. 49-66, <https://doi.org/10.1002/eqe.411>
- [8] Han, S.W., Chopra, A.K.: Approximate incremental dynamic analysis using the modal pushover analysis procedure. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35 (2006), pp. 1853-1873, <https://doi.org/10.1002/eqe.605>
- [9] Amirahmad, F.: Nonlinear dynamic analysis of modular steel buildings in two and three dimensions. Master Thesis, Department of Civil Engineering University of Toronto, USA, 2013.
- [10] Öncü, M.E., Yön, M.Ş.: Assessment of nonlinear static and incremental dynamic analyses for RC structures. *Computers and Concrete*, 18 (2016) 6, pp. 1195-1211.
- [11] Onat, O., Lourenco, P.B., Kocak, A.: Nonlinear analysis of RC structure with massive infill wall exposed to shake table. *Earthquakes and Structures*, 10 (2016) 4, pp. 811-828.
- [12] Chan, C.M., Zou, X.K.: Elastic and inelastic drift performance optimization for reinforced concrete buildings under earthquake loads. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 33 (2004), pp. 929-950, <https://doi.org/10.1002/eqe.385>
- [13] İnel, M., Özmen, H.B.: Effects of plastic hinge properties in nonlinear analysis of reinforced concrete buildings. *Engineering Structures*, 28 (2006), pp. 1494-1502, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.01.017>
- [14] Eslami, A., Ronagh, H.R.: Effect of elaborate plastic hinge definition on the pushover analysis of reinforced concrete buildings. *The Structural Design Tall and Special Buildings*, 23 (2014) 4, pp. 254-271.
- [15] Yön, B., Calayır, Y.: Effects of confinement reinforcement and concrete strength on nonlinear behaviour of RC buildings. *Computers and Concrete*, 14 (2014) 3, pp. 279-297.
- [16] Onat, O., Lourenco, P.B., Kocak, A.: Experimental and numerical analysis of RC structure with two leaf cavity wall subjected to shake table. *Structural Engineering and Mechanics*, 55 (2015) 5, pp. 1037-1053.
- [17] Rodrigues, H.: Biaxial seismic behaviour of reinforced concrete columns. PhD Thesis, Universidade de Aveiro, 2012.
- [18] Mwafy, A.M., Elnashai, A.S.: Static pushover versus dynamic collapse analysis of RC buildings, *Engineering Structures*, 23 (2001), pp. 407-424, [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(00\)00068-7](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(00)00068-7)

- [19] Dides, M.A., Llera, J.C.D.: A comparative study of concentrated plasticity models in dynamic analysis of building structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34 (2005), pp. 1005-1026, <https://doi.org/10.1002/eqe.468>
- [20] Duan, H., Hueste, M.B.D.: Seismic performance of a reinforced concrete frame building in China. *Engineering Structures*, 41 (2012), pp. 77-89, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.03.030>
- [21] Kadid, A., Yahiaoui, D., Chebili, R.: Behaviour of reinforced concrete buildings under simultaneous horizontal and vertical ground motions. *Asian Journal of Civil Engineering, (Building and Housing)*, 11 (2010), pp. 463-476.
- [22] Mwafy, A.: Assessment of seismic design response factors of concrete wall buildings. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 10 (2011), pp. 115-127, <https://doi.org/10.1007/s11803-011-0051-7>
- [23] Carvalho, G., Bento, R., Bhatt, C.: Nonlinear static and dynamic analyses of reinforced concrete buildings – comparison of different modelling approaches. *Earthquakes and Structures*, 4 (2013) 5, pp. 451-470.
- [24] Beigi, A.H., Christopoulos, C., Sullivan, T., Calvi, M.: Seismic response of a case study soft story frame retrofitted using a GIB system. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 44 (2015) 7, pp. 997-1014.
- [25] Yön, B., Calayır, Y.: The soil effect on the seismic behaviour of reinforced concrete buildings. *Earthquakes and Structures*, 8 (2015) 1, pp. 133-152.
- [26] Yön, B., Öncü, M.E., Calayır, Y.: Effects of seismic zones and site conditions on response of RC buildings. *Građevinar*, 67 (2015) 6, pp. 585-596, <https://doi.org/10.14256/JCE.1192.2014>
- [27] Chaulagain, H., Rodrigues, H., Spacone, E., Varum, H.: Assessment of seismic strengthening solutions for existing low-rise RC buildings in Nepal. *Earthquakes and Structures*, 15 (2015), pp. 251-268, <https://doi.org/10.12989/eas.2015.8.3.511>
- [28] Chaulagain, H., Rodrigues, H., Spacone, E., Varum, H.: Seismic safety assessment of existing masonry infill structures in Nepal. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 8 (2016) 3, pp. 511-539.
- [29] Sadraddin, H.L., Shao, X., Hu, Y.: Fragility assessment of high rise reinforced concrete buildings considering the effects of shear wall contributions. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 25 (2016) 18, pp. 1089-1102.
- [30] Khaloo, A., Nozhati, S., Masoomi, H., Faghihmaleki, H.: Influence of earthquake record truncation on fragility curves of RC frames with different damage indices. *Journal of Building Engineering*, 7 (2016), pp. 23-30, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.05.003>
- [31] Turkish Earthquake Code 2007, Ankara, Turkey.
- [32] SeismoStruct v7 - A computer program developed for the accurate analytical assessment of structures, subjected to earthquake strong motion. Available online: www.seissoft.com [September 8, 2014].
- [33] SeismoArtif v2.1 - A computer program for generating artificial earthquake accelerograms matched to a specific target response spectrum. Available online: www.seissoft.com [July 19, 2013].
- [34] SeismoSignal v5.1 - A computer program for the processing of strong-motion data. Available at: www.seissoft.com [July 19, 2013].
- [35] Mander, J.B., Priestley, M.J.N., Park, R.: Theoretical stress-strain model for confined concrete, *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 114 (1988) 8, pp. 1804-1826, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1988\)114:8\(1804\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804))
- [36] PEER Strong Motion Database, www.peer.berkeley.edu/smcat/search.html
- [37] Antoniou, S., Pinho, R.: Advantages and limitations of adaptive and non-adaptive force-based pushover procedures. *Journal of Earthquake Engineering*, 8 (2004) 4, pp. 497-522.