

Primljen / Received: 20.12.2017.

Ispravljen / Corrected: 29.6.2018.

Prihvaćen / Accepted: 17.7.2018.

Dostupno online / Available online: 10.2.2019.

Usporedba i ocjena modela za simulaciju ponašanja AB okvira s ispunom pod bočnim opterećenjem

Autori:



Mr.sc. **Mehmet Ömer Timurağaoğlu**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Uludağ, Turska
Građevinski fakultet
omertao@uludag.edu.tr



Prof.dr.sc. **Adem Doğangün**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Uludağ, Turska
Građevinski fakultet
adogangun@uludag.edu.tr



Prof.dr.sc. **Ramazan Livaoğlu**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Uludağ, Turska
Građevinski fakultet
rliva@uludag.edu.tr

Pregledni rad

Mehmet Ömer Timurağaoğlu, Adem Doğangün, Ramazan Livaoğlu

Usporedba i ocjena modela za simulaciju ponašanja AB okvira s ispunom pod bočnim opterećenjem

U radu se numerički istražuje seizmičko ponašanje AB okvira s ispunom, te se proračunom konačnih elemenata (FEA) ocjenjuje utjecaj triju različitih betonskih modela na ravninsko ponašanje AB okvira s ispunom. U tu se svrhu učinkovitost ispune ocjenjuje na modelima u prirodnoj veličini. Rezultati proračuna konačnih elemenata pokazuju da matematički model betona može promijeniti ponašanje AB okvira s ispunom. Utjecaj je naročito značajan za ponašanje nakon vršnog opterećenja.

Ključne riječi:

materijalni model, ispunski zid, armirani beton, metoda konačnih elemenata

Subject review

Mehmet Ömer Timurağaoğlu, Adem Doğangün, Ramazan Livaoğlu

Comparison and assessment of material models for simulation of infilled RC frames under lateral loads

In the present study, the behaviour of infilled RC frames under earthquake loading is investigated numerically, and the influence of three different concrete material models on the in-plane behaviour of infilled RC frames is evaluated using the finite element analysis (FEA). For this reason, the efficiency of infilled walls is examined on full scale models. Finite element analysis results show that mathematical model of concrete may change behaviour of infilled RC frames. The post-peak behaviour is especially influenced.

Key words:

material model, Infill wall, reinforced concrete, finite element method

Übersichtsarbeit

Mehmet Ömer Timurağaoğlu, Adem Doğangün, Ramazan Livaoğlu

Vergleich und Bewertung des Modells für die Simulation des Verhaltens von Stahlbetonrahmen mit Füllung bei seitlicher Belastung

In der Abhandlung wird das seismische Verhalten von Stahlbetonrahmen mit Füllung numerisch untersucht, und durch die Finite-Elemente-Berechnung (FEA) wird der Einfluss dreier unterschiedlicher Betonmodelle auf das Gleichgewichtsverhalten der Stahlbetonrahmen mit Füllung bewertet. Zu diesem Zweck bewertet man die Wirksamkeit der Füllung an Modellen in natürlicher Größe. Die Ergebnisse der Finite-Elemente-Berechnung zeigen, dass das mathematische Betonmodell das Verhalten der Stahlbetonrahmen mit Füllung verändern kann. Der Einfluss ist besonders für das Verhalten nach der Spitzenbelastung wichtig.

Schlüsselwörter:

Materialmodell, Massivwand, Stahlbeton, Finite-Elemente-Methode

1. Uvod

Zidne ispune se često, zbog raznih razloga, koriste u armiranobetonskim okvirnim konstrukcijama, kako u Turskoj tako i u mnogim drugim državama diljem svijeta. Ispune, koje često nazivamo i zidane ispune, sastavljene su od elemenata povezanih mortom, a u tu se svrhu koriste različiti elementi kao što su opeka, plinobetonski blokovi ili puna opeka. Zidane ispune mogu biti s otvorima ili bez otvora, ovisno o zahtjevima. Ponašanje zida kao cjeline teško se može razumjeti jer se veličine, dimenzije i mehanička svojstva elemenata i morta razlikuju, a tu je i pitanje interakcije zida i okvira.

lako je poznato da zidane ispune poboljšavaju krutost i čvrstoću okvira, u statičkom se proračunu njihov doprinos često zanemaruje. Najveći nedostatak AB okvira sa zidanom ispunom sastoji se u brzom padu krutosti, naglom smanjenju čvrstoće i disipaciji energije uslijed potresnog opterećenja. S druge strane, bez obzira na njihov doprinos konstrukcijskom sustavu, procjenom potresnih oštećenja utvrđeno je da zidane ispune ipak u određenoj mjeri štetno djeluju na ponašanje konstrukcije. Ti su se nedostaci pokazali u više navrata i mogu se uočiti na primjerima štete nakon potresa, a posljedica su djelovanja primjerice su torzije, meke katne konstrukcije, slabe katne konstrukcije i stupa. U literaturi se mogu naći detaljna objašnjenja tih djelovanja [1]. Uz to, vrlo kruta zidana ispunna može se ponašati kao nearmirani posmični zid te u slučaju potresa uzrokovati oštećenje stupova zbog formiranja ekvivalentnog dijagonalnog tlačnog štapa u zidanoj ispunu, kao što se to vidi na slici 1.



Slika 1. Oštećeni okvir s ispunom: a) potres Adana-Ceyhan iz 1998. [3]; b) potres Dinar iz 1995. [4]; c) potres Van iz 2011.

Modeliranje konačnih elemenata konstrukcija dovelo je do značajnog napretka u području simuliranja složenih inženjerskih problema. Takvi su postupci posebno praktični kod okvirnih konstrukcija s ispunom jer njihovo ponašanje

ovisi o više parametara. Modeliranje okvira s ispunom može se općenito podijeliti u dvije skupine: mikromodeliranje i makromodeliranje. Makro-modelom se pokušava obuhvatiti sveukupno (globalno) ponašanje konstrukcijskog elementa bez modeliranja svih mogućih oblika lokalnog popuštanja. S druge strane, mikromodelima se pokušava modelirati ponašanje konstrukcijskog elementa na način da se velika pažnja posvećuje upravo detaljima, pri čemu se pokušavaju obuhvatiti svi mogući oblici popuštanja [2].

Mnogi istraživači primjenjuju metodu konačnih elemenata (eng. *finite element method* - FEM) kako bi što preciznije odredili ponašanje sustava AB okvira s ispunom pri djelovanju potresa. U radu [5] autori koriste model razmazanih pukotina u analizi ponašanja betona u AB okvirima i zidanim elementima. U radu [6] autori prikazuju model nepridruženog kontakta koristeći dostupne podatke o ispitivanju zidanih spojeva kako bi modelirali kontakt između okvira i ispune i morta kojim su povezani blokovi. U radu [7] autori se služe modelom kohezijskog kontakta kako bi simulirali ponašanje morta u sljubnicama između zidanih elemenata i ponašanje na kontaktu između okvira i panela, te istražuju postupak formuliranja konačnih elemenata razmazanih pukotina kako bi modelirali beton u AB okvirima sa zidanim elementima. U radu [2] autori predlažu realan kriterij za opisivanje podjele između okvira i ispune kako bi simulirali složeno ponašanje okvira s ispunom pod bočnim opterećenjem. Na temelju rezultata dobivenih na 189 proračunskih modela, autori rada [8] zaključuju da su broj katova (visina građevine) i postotak posmičnih zidova osnovni parametri koji utječu na osnovni period konstrukcije. Osim toga, postotak ispunskih zidova i broj polja gotovo jednako utječu na osnovni period konstrukcija. U radu [9] kombiniraju se postupci diskretnog modeliranja i modeliranja razmazanim pukotinama kako bi se uklonio nedostatak elemenata razmazanih pukotina u simuliranju krutog posmičnog ponašanja AB elemenata i mješovitog popuštanja spojeva između morta i elemenata. U radu [10] koristi se konstitutivni model plastičnosti oštećenja za zidane konstrukcije koji se obično primjenjuje za beton i ostale kvazikrte materijale. U radu [11] predlaže se diskretna metoda za proračun s tehnikom za modeliranje koherentnih pukotina na bazi oštećenja, a radi simuliranja popuštanja AB okvira sa zidanom ispunom. U radu [12] prikazuje se napredno matematičko mikromodeliranje okvira s ispunom, koje upućuje na prednosti i nedostatke svakog pojedinačnog mikro-modela. U radu [13] predlaže se alternativan pristup za simuliranje potresnog ponašanja okvirnih konstrukcija s ispunom koji se može koristiti za konstrukcije makro i mikro veličine. U radu [14] istražuje se ciklični odziv AB okvira sa zidanom ispunom primjenom rezultata eksperimentalnih ispitivanja i modificiranog okretnog (pivot) modela. Nakon detaljnog i iscrpnog analitičkog istraživanja parametara koji utječu na osnovni period AB konstrukcija, utvrđeno je u radu [15] da sljedeći ključni parametri utječu na osnovni period AB konstrukcija: broj katova, raspon, krutost zidnih panela s ispunama, lokacija mekih katova te vrsta tla. U radu [16] daje se opsežan pregled literature, uključujući i postupke modeliranja

koji su razvijeni u proteklim desetljećima, od poboljšanih pristupa za nelinearno mikromodeliranje pomoću konačnih elemenata pa do pojednostavljenih ekvivalentnih makromodela s jednim ili više tlačnih štapova. U radu [17] razmatra se mehaničko ponašanje okvira sa zidanim ispunama pod utjecajem ravninskog bočnog opterećenja te analitička zakonitost djelovanja vertikalnih opterećenja na karakteristike dijagonalnih tlačnih štapova sa zglobnom vezom. Nedavno je u radu [18] predložen analitički izraz za određivanje ekvivalentne širine tlačnog štapa, uzimajući u obzir djelovanje otvora i vertikalnog opterećenja. Spomenuti se izraz bazira na velikom broju numeričkih modela konačnih elemenata. U radu [19] predlaže se alternativni pristup na bazi makroelemenata koji se koriste u seizmičkoj analizi okvirnih konstrukcija s ispunom. Analizira se višekatni prototip ravninskog okvira, a rezultati se uspoređuju s uobičajenim modelom s jednim tlačnim štapom. U još novijem radu [20] proučava se utjecaj kontinuiranog i koncentriranog opterećenja na čelični okvir s ispunom. Dobiveni rezultati pokazuju da kontinuirano opterećenje daje povećanje čvrstoće od 18,5 % i povećanja krutosti od 29 % AB okvira s ispunom. Nakon eksperimentalnog istraživanja AB okvira sa zidanim ispunom provedenog s različitim bočnim čvrstoćama, predlaže se usvajanje odnosa bočne projektirane čvrstoće AB okvira i zidane ispune (ispuna se sastoji od šupljih glinenih blokova) većeg od 1,2 (što uključuje i parcijalni faktor sigurnosti od 1,3) kako bi se postigli kontrolirani mehanizmi popuštanja te smanjili negativni utjecaji zidane ispune na AB okvire [21]. U parametarskoj studiji je utvrđeno da parametri površine sloma i kut širenja bitno utječu na graničnu čvrstoću, krutost pri raspucavanju, te na ponašanje prije i nakon popuštanja okvira s ispunom, dok parametri koji se odnose na energiju sloma tek donekle utječu na granično opterećenje i ponašanje modela nakon popuštanja [22]. Osim toga, predlaže se i odnos između zahtjeva međukatnog pomaka konstrukcijskih konfiguracija s ispunom i bez nje u svrhu kontroliranja oštećenja zidane ispune [23]. U radu [24] provodi se analiza cikličkih ravninskih ispitivanja AB okvira s čvrstom zidanom ispunom, pri čemu se naglasak stavlja na ponašanje ispune, raspodjelu oštećenja, bočnu krutost, čvrstoću i kapacitet disipacije, a daje se i moguća definicija graničnih stanja. Nedavno je u radu [25] objavljen pregled dosadašnjeg stanja područja modeliranja AB okvira sa zidanom ispunom podvrgnutih cikličkim opterećenjima. Također je istražena i konfiguracija zida s ispunom koja je važna za utjecaj kratkog stupa na AB okvir [26].

Neki su istraživači posljednjih godina ispitivali utjecaje otvora i vertikalnih opterećenja na seizmičko ponašanje okvira s ispunom. Utjecaji otvora na seizmičko ponašanje AB okvira s ispunom eksperimentalno se istražuje u [27], a predložen je i model tlačnih štapova za AB okvire s ispunom i otvorima. Odgovarajuće empirijske formule predlaže se u radu [28] na temelju numeričkog proračuna AB okvira s ispunom i s tipičnim otvorima za prozore i vrata. Eksperimentalni rezultati pokazuju da otvori za prozore i vrata bitno utječu na bočnu otpornost, početnu krutost i disipaciju energije sustava. Prema eksperimentalnim i numeričkim analizama, prisutnost većih

otvora u ispuni dovodi tek do ograničenog poboljšanja čvrstoće u odnosu na okvir bez ispune [19] te u manjoj mjeri djeluje na način otkazivanja [29], dok je utjecaj vertikalnih opterećenja na krutost širine bezdimenzijskog tlačnog štapa značajan kod potpuno ispunjenih panela, a gotovo zanemariv kod ispunjenih panela s velikim otvorima [18].

Izvanravninski (eng. *out of plane* - OPP) odziv okvira s ispunom je također ključan parametar i treba se uzeti u obzir jer uzrokuje gubitak života tijekom potresa. Većina eksperimentalnih podataka pokazuje da izvanravninska čvrstoća nakon prve pojave pukotina na zidu s ispunom ovisi o tlačnoj, a ne o vlačnoj čvrstoći zida [13]. Nedavno je u radu [30] ponuđen prikaz literature o izvanravninskom ponašanju okvira s ispunom, počevši od ranijih modela baziranih na savijanju pa do najnovijih ravninskih-izvanravninskih integriranih makromodela.

Kao što se može vidjeti iz gornjeg prikaza, brojni istraživači naglašavaju značenje okvirnih konstrukcija s ispunom (eng. *infilled frame structures* - IFS). Mnogi od njih konstrukcije IFS istražuju eksperimentalno, a neki naglasak stavljaju na numeričko ili analitičko istraživanje IFS-a. Međutim, prema spoznajama autora, utjecaj matematičkih modela za beton nije dovoljno istražen u okviru numeričkih studija.

Uzimajući u obzir gornja razmatranja, u ovom radu se ponajprije istražuju utjecaji materijalnih modela betona koji su dobro poznati i najčešće se spominju u literaturi. U tom kontekstu vrijedi spomenuti da ostali složeni modeli betona prikazani u literaturi, tj. nelinearni cementni, sbeta itd. [31], ne ulaze u okvir ovog rada. Dakle, cilj je rada analizirati utjecaj matematičkih modela betona na ponašanje okvirnih konstrukcija s ispunom (IFS) pomoću metode konačnih elemenata (FEM). Zbog toga se jednokatni AB okvir s jednim poljem u prirodnoj veličini, s ispunom i bez nje, modelira i izračunava na djelovanje bočnog opterećenja, a za to se koristi FEM. Eksperimentalna istraživanja utemeljena na ovom modelu prikazana su u literaturi. Isto tako, u radu se istražuje i utjecaj površinskog kohezijskog ponašanja, tako bi se odredila interakcija ispune i okolnog okvira.

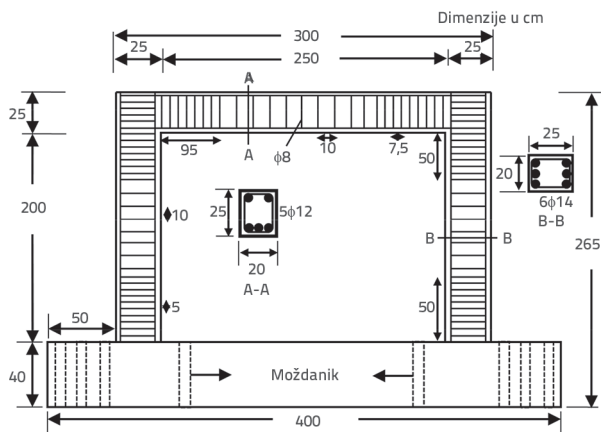
2. Kratak prikaz eksperimentalnog programa

2.1. Prototipna konstrukcija i probni uzorci

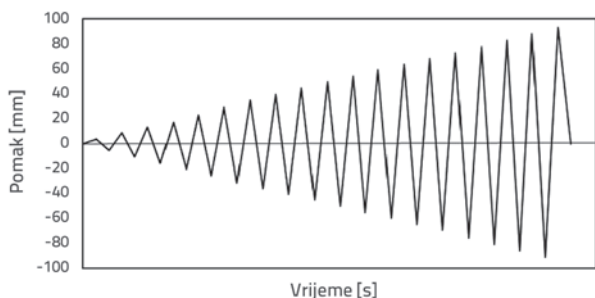
Eksperimentalno ispitivanje proveli su autori ovog rada i autor rada [32] u laboratoriju za konstrukcije Tehničkog sveučilišta Karadeniz (KTU) kako bi se istražilo ponašanje armiranog i nearmiranog okvira sa zidanom ispunom pod utjecajem promjenljivih bočnih opterećenja.

Jedan uzorak okvira bez ispune i dva uzorka AB okvira s ispunom analizirani su u sklopu eksperimentalnih ispitivanja. Korišteni su AB okviri s ispunom od plinobetona i AB okviri s ispunom od šuplje opeke. Jednokatni AB okvir s jednim poljem odabran je kao prototipna konstrukcija. Vrijednost 1/1,25 usvojena je kao omjer između visine i dužine (h/l). Armatura je projektirana u skladu s uobičajenim postupcima za postojeće zgrade u Turskoj. Odlučeno je da uzorci budu u prirodnoj veličini radi podudarnosti s

postojećim građevinama u Turskoj. Podrobniji podaci o uzorcima za okvir prikazani su na slici 2. Dimenzije stupova su 20 x 25 cm, a dimenzije grede iznose 25 x 20 cm. Dimenzije zida su 250 x 200 x 20 cm. Dimenzije krute podloge okvira iznose 400 x 60 x 40 cm. Za uzdužnu armaturu stupova korišteno je šest šipaka promjera 14 mm. Za uzdužnu armaturu na dnu grede korištene su tri šipke promjera 12 mm, dok su dvije šipke promjera 12 mm korištene na vrhu grede. Podrobniji detalji za stupove i grede prikazani su na slici 2. Kruta podloga povezana je s tlom pomoću moždanika. Uzorak prikazan na slici 2. opterećen je cikličnim bočnim opterećenjima. Opterećenje se nanosi povećavanjem amplitude u svakom ciklusu, kako je prikazano na slici 3.



Slika 2. Dimenzije uzoraka i podaci o armiranju



Slika 3. Amplitude pomaka korištene u laboratorijskim ispitivanjima i u proračunu konačnih elemenata

2.2. Svojstva materijala

Kako je ovaj program eksperimentalnih ispitivanja proveden u svrhu određivanja slabosti armiranobetonskih građevina u Turskoj, svojstva materijala odabrana su u skladu s tim ciljem. Tlačna čvrstoća betona iznosila je 20 MPa, a kao modul

elastičnosti usvojena je vrijednost od 20.000 MPa. S druge strane, utvrđeno je da se za ovaj materijal može usvojiti vlačna čvrstoća otprilike od 2 MPa. Za ispunu od plinobetona usvojena je tlačna čvrstoća od 1,0 MPa a za opeku 4,1 MPa. Osim toga, za plinbeton je usvojen modul elastičnosti od 800 MPa, a za šuplju opeku 1000 MPa. U svrhu utvrđivanja svojstava betona provedena su ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama (dimenzija 15 x 15 x 15 cm) za stupove i grede, dok su za rebrastu armaturu provedena ispitivanja vlačne čvrstoće. Za svojstva morta, plinobetona i opeke usvojene su vrijednosti koje je iskazalo poduzeće koje je dostavilo uzorke. Rezultati su prikazani u tablici 1. Dimenzije opeke su 13,5 x 19 x 19 cm, a dimenzije plinobetona 60 x 25 x 19 cm.

Tablica 1. Mehanička svojstva materijala korištenih u ispitivanju

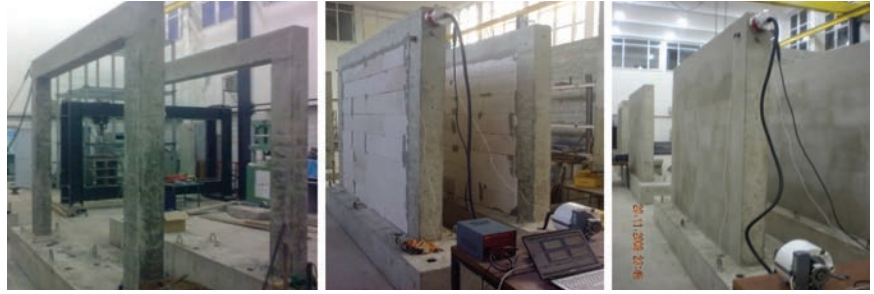
Svojstvo	Srednja vrijednost [MPa]
Tlačna čvrstoća betona	20
Modul elastičnosti betona	20.000
Tlačna čvrstoća plinobetona	1,0
Modul elastičnosti plinobetona	800
Posmična čvrstoća plinobetona	0,15
Tlačna čvrstoća zida od opeke	4,1
Modul elastičnosti zida od opeke	1000
Posmična čvrstoća zida od opeke	0,33

Moduli elastičnosti materijala određeni su na temelju klasične modalne analize (tablica 1.) primjenom postupka za ažuriranje modela konačnih elemenata [33] ručnim podešavanjem pomoću posebnog računalnog programa. Ručno podešavanje uključuje ručne promjene geometrije modela i parametara za modeliranje postupkom pokušaja i pogreške, a na temelju inženjerske prosudbe. Pritom je cilj postići što bolju podudarnost između rezultata analitičkog modeliranja i rezultata eksperimentalnih ispitivanja. Metoda modalne analize služi za određivanje dinamičkih svojstava sustava, a za to se primjenjuje poseban pobuđivač prikazan na slici 4.b. U ovom se radu koriste osjetljivi akcelerometri za određivanje vibracija u konstrukciji generiranih pomoću pobuđivača. Odabir akcelerometra za ovo ispitivanje bilo je vrlo važno kako bi se omogućilo mjerenje intervala određene osjetljivosti i frekvencija. Karakteristike akcelerometra korištenog u ovom radu iskazane su u tablici 2., a sam akcelerometar prikazan je na slici 5. Akcelerometri su pričvršćeni na okvir bušenjem rupe. Korištena je ćelija za kanaliziranje podataka tipa Quattro (slika 4.a). Signali iz akcelerometra i pobuđivača provode se do te ćelije, nakon čega se pohranjuju

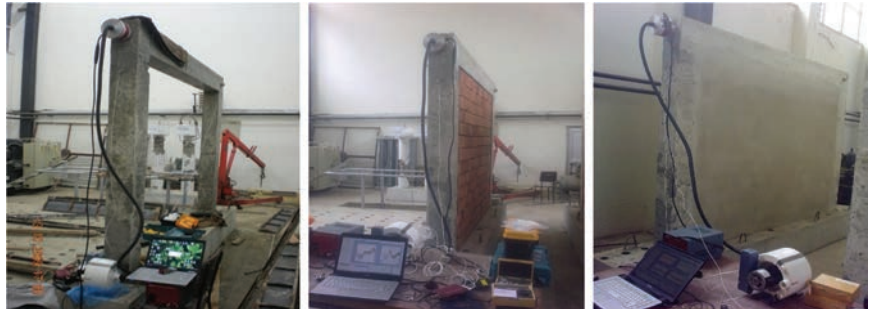
Tablica 2. Tehničke karakteristike piezoelektričnog akcelerometra KB12VD

Osjetljivost	10000 mV/g ± 5 %	Radna temperatura	-20 - 80 °C
Područje linearne frekvencije	0,08 - 260 Hz	Dimenzije	R = 50 mm, H = 37 mm
Raspon mjerenja	-0,6 - 0,6 g	Ukupna masa	150 g

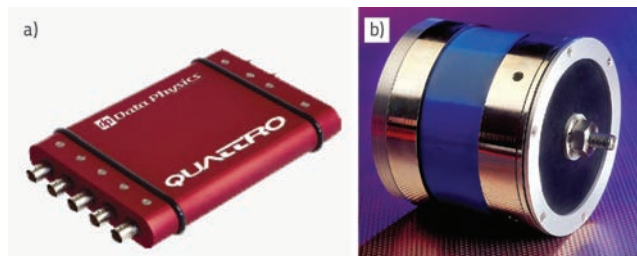
i obrađuju pomoću računalnog programa SignalCalc 240. Modalna ispitivanja uzoraka plinobetona i opeke koji se koriste kao ispuna AB okvira prikazana su na slikama 6. i 7. Ispitivanja se zasebno ponavljaju za područja od 0-50 Hz, 0-100 Hz i 0-200 Hz i to bilo na temelju pobude iz pobuđivača i/ili okoline. Pritom je cilj odrediti utjecaj šuma koji se javlja primjenom raznih vrsta pobuda. Korišteni su podaci dobiveni pobudom tipa Impuls i Burst Random. Rezultati su dobiveni Butterworthovim pojasno nepropusnim filtrom za područje od 0-50 Hz. Prve frekvencije okvira bez ispune, zida od plinobetona bez žbuke i sa žbukom iznosile su redom 22,31 Hz, 22,26 Hz i 24,12 Hz. Prve frekvencije za okvir s ispunom od opeke iznosile su 17,38 Hz, 17,77 Hz i 18,24 Hz za okvir bez žbuke i za okvir s ispunom od opeke bez žbuke i za okvir s ispunom od opeke sa žbukom. Druge frekvencije iznosile su 21,07 Hz, 21,34 Hz i 27,07 Hz. Rezultati pokazuju da žbuka bitno utječe na bočno ponašanje AB okvira s ispunom, i to čak i kod niske razine deformacija.



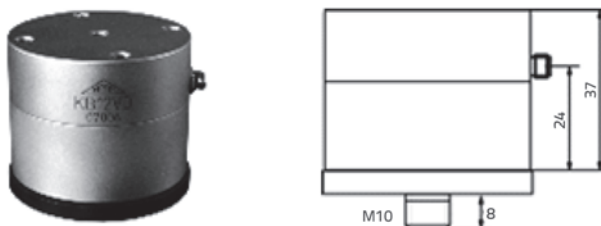
Slika 6. Klasična modalna ispitivanja za okvir s plinobetonskim blokovima



Slika 7. Klasična modalna ispitivanja za okvir ispunjen opekam



Slika 4. a) Čelija za kanaliziranje podataka tipa Quattro; b) Pobuđivač



Slika 5. Piezoelektrični akcelerometar KB12VD

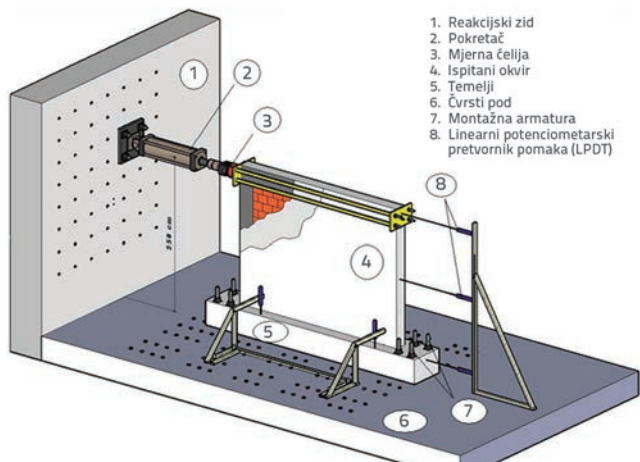
2.3. Rezultati eksperimentalnih ispitivanja

Priprema eksperimentalnog ispitivanja s uređajima prikazan je na slici 8. Za nanošenje reverzibilnog cikličnog bočnog opterećenja na vrh okvira za ispitivanje korišten je hidraulični servo-pokretač. Protokol opterećenja prikazan je na slici 3. Bočna opterećenja i pomaci na vrhu mjereni su pomoću ćelije

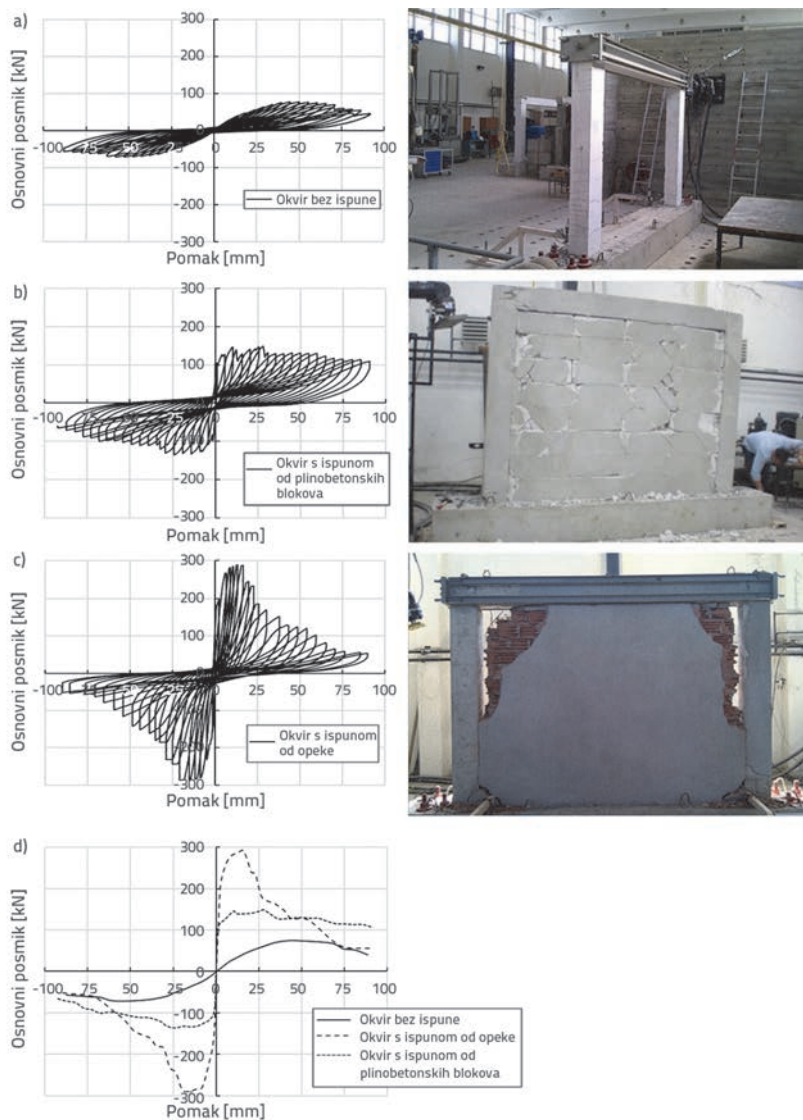
za mjerenje opterećenja kapaciteta 500 kN te primjenom linearnog potenciometarskog pretvornika pomaka (eng. *linear potentiometric displacement transducer* - LPDT). Dobivene vrijednosti zabilježene su pomoću sustava za prikupljanje podataka te su nakon toga preneseni na računalo [32].

Histerezne krivulje bočne sile - pomak na vrhu za AB okvire bez ispune, za AB okvire s ispunom od plinobetonskih blokova, te za AB okvire s ispunom od opeke, prikazane su na slikama 9a, 9b i 9c. Maksimalne vrijednosti nosivosti su 48,5 kN, 135,7 kN i 289,1 kN, a odgovarajući pomaci iznose 49,8 mm, 24,1 mm i 13,3 mm. Uzorci nakon cikličnog opterećenja također su prikazani na slici 9. Horizontalne su se pukotine pojavile na vrhu i dnu stupova uslijed savijanja uzorka okvira bez ispune. Posmično klizanje i vlačno popuštanje zabilježeno je u ispuni od plinobetonskih blokova, dok je pojava plastičnih zglobova zabilježena je na vrhu i dnu stupova istog uzorka. Osim toga, u ispuni od opeke zabilježeno je pucanje materijala u kutu ispune.

Rezultati ispitivanja sila-pomak prikazani su na slici 9.d. Na toj se slici jasno vidi koliko su bolji rezultati za okvire s ispunom u odnosu na okvire bez ispune. Nosivost AB okvira s ispunom od plinobetonskih blokova za 2,8 puta je veća u odnosu na okvir bez ispune. Kod AB okvira s ispunom od opeke ta je razlika još očitija i iznosi čak 6 puta. Kod okvira s ispunom povećanje početne krutosti također je značajno kada se usporedi s okvirom bez ispune. Pri tome treba naglasiti da je krutost okvira s ispunom od opeke veća od krutosti okvira s ispunom od plinobetonskih blokova. U konačnici je doprinos ispune okviru s ispunom od opeke iznosio otprilike 70 mm pri kraju ispitivanja, kao što se i vidi na slici 9.d, a doprinos ispune s plinobetonskim blokovima nastavljen je sve do kraja ispitivanja.



Slika 8. Pripreda eksperimenta [32]



Slika 9. Eksperimentalne krivulje sila-pomak za: a) okvir bez ispune; b) okvir s ispunom od plinobetonskih blokova; c) okvir s ispunom od opeke; d) usporedba eksperimentalnih rezultata

3. Modeliranje konačnih elemenata za AB okvir s ispunom

3.1. Modeliranje konačnih elemenata za AB okvir

Tri različita matematička modela za beton koriste se u ovom radu za proračun okvira bez ispune, AB okvira s ispunom od plinobetonskih blokova i AB okvira s ispunom od opeke. Ti modeli se temelje na nelinearnoj metodi konačnih elemenata (FEM). Proveden je proračun metodom postupnog guranja koristeći pritom samo pozitivne amplitude pomaka upotrebene u eksperimentalnim ispitivanjima (slika 3.). Utjecaji betona i čelika nisu razmotreni zasebno, već se armirani beton u proračunu konačnih elemenata (eng. *finite element analysis* - FEA) definira kao homogeni izotropni materijal. Drugim riječima, u proračunu FEA primjenjuje se samo ponašanje oviđenog betona. Za definiranje

učinkovitosti modela materijala primjenjuju se tri različite karakteristike naprezanja-deformacije [35-37]. Ti su modeli materijala detaljnije opisani u nastavku ovog teksta. Odnos naprezanja i deformacije predložen u [35] izražava se pomoću odgovarajućih jednadžbi, kao što se također može vidjeti u nastavku. Dugački razlomak u jednadžbi (1) označava odstupanje od linearnoelastičnog dijela. Krivulja naprezanja i deformacija za ovaj je model prikazana na slici 10.

$$f = f_0 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \frac{n}{n-1 + (\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0})^n} \tag{1}$$

$$\varepsilon_0 = k \cdot 10^{-4} \sqrt[4]{f_0} \tag{2}$$

$$n(\text{beton}) = 0.4 \cdot 10^{-3} f_0 + 1.0 \tag{3}$$

$$E = \frac{10^4 f_0 + 17.24}{k \sqrt[4]{f_0}} \tag{4}$$

gdje je:

f_0 - maksimalna tlačna čvrstoća betona (MPa)

ε_0 - odgovarajuća deformacija

n - približna funkcija tlačne čvrstoće betona.

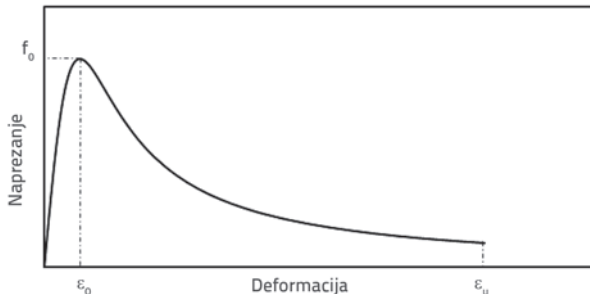
U tim se jednadžbama k definira kao funkcija vrste agregata i varira od 7,63 do 9,37 mm^{1/2}/N^{1/4}.

Odnos jednoosnog naprezanja i deformacija za beton definiran u [36] opisuje se kako slijedi u izrazima (5) i (6):

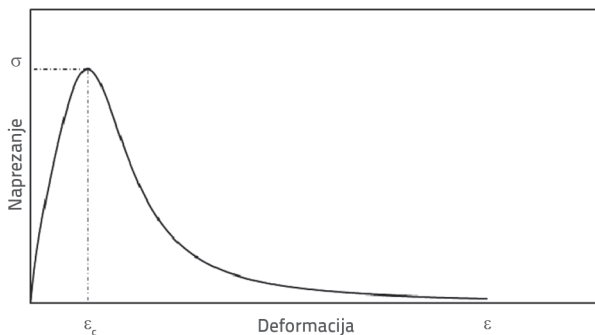
$$\sigma_c = \frac{E_c \varepsilon_c}{1 + (R + R_E - 2) \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right) - (2R - 1) \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right)^2 + R \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right)^3} \quad (5)$$

$$R = \frac{R_E (R_\sigma - 1)}{(R_\varepsilon - 1)^2} - \frac{1}{R_\varepsilon} \quad (6)$$

gdje je $R_E = E_c/E_0$ i $E_0 = f_c/\varepsilon_0$. Predlažu se sljedeće vrijednosti: $\varepsilon_0 = 0,0025$, $R_\varepsilon = 4$ i $R_\sigma = 4$. Krivulja napreznja i deformacija za ovaj je model prikazana na slici 11.

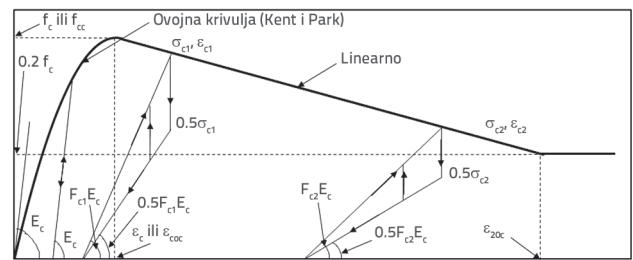


Slika 10. Krivulja napreznja i deformacija za beton [35]



Slika 11. Krivulja napreznja i deformacija za beton [36]

U proračunu nelinearnom metodom konačnih elemenata za AB okvire s ispunom iskorišten je Thompsonov i Parkov model materijala [37] koji se često spominje u literaturi. Thompsonovim i Parkovim modelom definiraju se putanje rasterećenja i opterećenja te se za krivulju napreznja i deformacija ($\sigma - \varepsilon$) koristi razvijeni Kentov i Parkov model, kao što je prikazano na slici 12. Na toj slici vidimo da u slučajevima kada je $\varepsilon_c < \varepsilon_{c0}$ ($\varepsilon_{c0} = 0,002$) krivulja rasterećenja postaje paralelna s ishodištem krivulje $\sigma - \varepsilon$. Kada se na element ponovo nanese opterećenje, krivulja $\sigma - \varepsilon$ slijedi istu putanju. U slučajevima kada je $\varepsilon_c > \varepsilon_{c0}$ krivulja rasterećenja se prikazuje s dvije ravne crte. Nagib prvog dijela napreznja uslijed rasterećenja je beskonačan, dok se nagib u drugom dijelu definira kao $0,5E_c F_{ct}$. Odnosi koji definiraju krivulju napreznja i deformacija u Thompsonovom i Park-vom modelu prikazani su na slici 12. Detaljan matematički opis ovog modela može se naći u odgovarajućoj literaturi [37].



Slika 12. Krivulja napreznja i deformacija za Thompsonov i Parkov model [37]

3.2. Modeliranje konačnih elemenata za zid s ispunom

Kako na zidove utječu različiti parametri kao što su dimenzije elemenata, horizontalna ili vertikalna širina morta, svojstva morta i elemenata te potreban rad, modeliranje zidova nije jednostavan zadatak. Poznato je da se zidovi mogu modelirati na tri različita načina: makromodeliranjem, pojednostavljenim mikromodeliranjem i detaljnim mikromodeliranjem.

Kada se primjenjuje postupak makromodeliranja, elementi, mort i kontakti između morta i elemenata razmazuju se u homogeni kontinuum. Kod mikromodeliranja, prošireni elementi se predstavljaju elementima kontinuum, dok se ponašanje spojeva mortom i kontakata između elemenata i morta zajednički predstavlja u vidu elemenata diskontinuum. Kada se primjenjuje postupak mikromodeliranja, elementi i mort u spojevima se predstavljaju elementima kontinuum, dok se kontakt između elemenata i morta predstavlja elementima diskontinuum [38]. Detaljno objašnjenje ovih modela predlaže Lourenço [38].

U ovom se radu zidovi s ispunom razmatraju kao homogeni materijal. Drugim riječima, u proračunu se zanemaruju utjecaji elemenata i morta. Ponašanje zidova s ispunom predstavlja se pomoću modela poznatog pod nazivom oštećenje betona pri plastifikaciji (engl. *concrete damage plasticity* - CDP) koji se koristi u programskom paketu ABAQUS [39] koji se temelji na metodi konačnih elemenata. Provedena je i studija osjetljivosti kako bi se usvojila svojstva CDP. Međutim, u ovom se radu ipak ne iskazuju rezultati analize osjetljivosti. Opći prikaz parametara koji se primjenjuje u ovom modelu daje se u poglavlju 3.4. Za definiranje odnosa napreznja i deformacija za zid s ispunom koristi se model materijala koji je već korišten za modeliranje zidanog mosta [40]. Taj se model predlaže u [36] za definiranje krivulje napreznja i deformacija za običan beton. U ovom se modelu jednoosna tlačna čvrstoća definira kako je dano izrazom (7):

$$\sigma_c = \frac{E_0 \varepsilon_c}{1 + \left(\frac{E_0 \varepsilon_p}{\sigma_p} - 2\right) \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_p}\right) + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_p}\right)^2} \quad (7)$$

gdje su σ_c i ε_c tlačno napreznje i tlačna deformacija, dok vrijednosti σ_p i ε_p predstavljaju maksimalno napreznje i

odgovarajuću deformaciju. Vrijednost E_0 predstavlja modul elastičnosti zida s ispunom. Kako zidovi s ispunom iskazuju izuzetno krto ponašanje u vlaknu, teško se može ispitati nelinearno ponašanje pri vlačnom naprezanju. U ovom je proračunu usvojeno da vlačno naprezanje iznosi 10 % od tlačnog naprezanja i to zato što se taj postotak često koristi u literaturi.

3.3. Modeliranje konačnih elemenata za interakciju zida i okvira

U proračunu FEA, interakcija ispune i okvira može se modelirati u obliku opružnih elemenata ili spojnih elemenata [9, 42]. Kako bi se postigao precizan rezultat, važno je koristiti element koji prikladno predstavlja ponašanje između zida i okvira. U proračunu se koristi model površinskog kohezijskog ponašanja. Korištenje elementa koji predstavlja interakcijsko ponašanje između zida i okvira vrlo je važno kako bi se dobio točan rezultat. Taj se model može definirati kao interakcijsko svojstvo površina, a koristi se za modeliranje ponašanja naorezanja - razdvajanja na spoju. Zakon naprezanja i razdvajanja koji se primjenjuje u proračunu FEA odnosi se na linearno elastično ponašanje, a to se ponašanje može izraziti kako slijedi:

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{sn} & K_{tn} \\ K_{ns} & K_{ss} & K_{nt} \\ K_{nt} & K_{st} & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} = K\delta \quad (8)$$

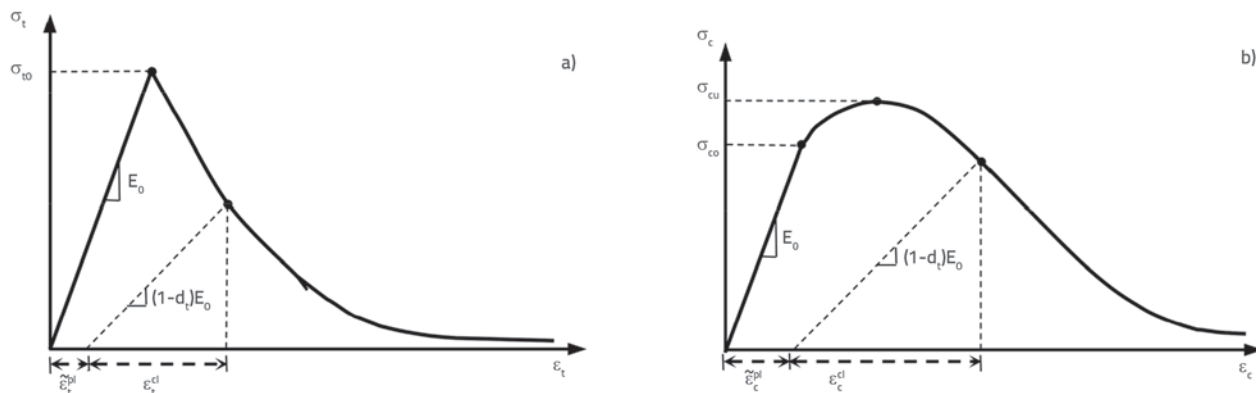
Vektor nominalnog vučnog naprezanja, t , sastoji se od tri komponente: dvije komponente u dvodimenzionalnim problemima, t_n i t_s i jedne u trodimenzionalnim problemima t_t . One predstavljaju normalno naprezanje (uzduž lokalna tri smjera u tri dimenzije i uzduž lokalna dva smjera u dvije dimenzije) i dva posmična vučna naprezanja (uzduž jednog i dva lokalna smjera u tri dimenzije i uzduž jednog lokalnog smjera u dvije dimenzije). Odgovarajuća odvajanja opisuju se oznakama δ_n , δ_s i δ_t [39].

3.4. Verifikacija modela

Sustavi su izračunani i modelirani pomoću programa ABAQUS za proračun konačnih elemenata. Za modeliranje AB okvira i

zidane ispune koristi se linearna opeka s 8 čvorova i reducirana integracija s kontrolnim elementom "hourglass" (C3D8R). Za elemente C3D8R koristi se točka reducirane integracije, što znači da je samo jedna točka integracije u sredini. Primjenom odgovarajuće mreže heksaedarskih elemenata dobiva se opće rješenje jednake točnosti, ali uz kraće vrijeme računanja.

Za ispunu se koristi ABAQUS-ov model materijala oštećenja betona pri plastifikaciji (CDP). Tim se modelom može općenito modelirati beton i ostali kvazikruti materijali kod svih vrsta konstrukcija. Parametri materijala koji se koriste u ovom baždarnom modelu prikazani su u tablici 3. Radi se o sljedećim parametrima: kut širenja ψ , ekscentričnost ϵ , odnos početnog ekvidvoosnog tlačnog graničnog naprezanja i početnog jednoosnog tlačnog graničnog naprezanja f_{b0}/f_{c0} , odnos druge invarijante naprezanja na vlačnom meridijanu i tlačnog meridijana k i parametra viskoznosti χ . Prva dva parametra koriste se za oblikovanje potencijalnog tečenja, a vrijednosti f_{b0}/f_{c0} i χ za definiranje oblika funkcije tečenja. Parametar viskoznosti (χ) koristi se za reguliranje viskoplastičnog materijala. Taj se parametar primjenjuje za rješavanje problema konvergencije koja proizlazi iz smekšavanja ili smanjenja krutosti materijala. Mala vrijednost parametra viskoznosti (mala u odnosu na karakteristični vremenski interval) obično pomaže u poboljšanju brzine konvergencije modela u režimu omekšavanja, pri čemu se ne umanjuje točnost rezultata [39]. Kut širenja (ψ) u velikoj mjeri utječe na ponašanje materijala. Proračun zidane ispune pokazao je da se materijal ponaša duktilno kada kut širenja varira od 30° do 37° . Krto se ponašanje postiže kada je taj kut blizu vrijednosti 0° do 1° [10]. Kako bi se riješio problem konvergencije, na temelju odgovarajućih parametarskih studija usvojen je parametar viskoznosti u iznosu od 0,004. Zadana vrijednost 1 koristi se za ekscentričnost kada se radi o betonu. Zadane vrijednosti se koriste i za f_{b0}/f_{c0} i k . Odnosi između naprezanja i deformacije u CDP-u prikazani su na slici 13. za vlak i tlak. Varijable oštećenja (d_c i d_t) nisu zadane u proračunu. To znači da se model ponaša kao model plastičnosti ($\epsilon_t^{-pl} = \epsilon_t^{-ck}$ i $\epsilon_c^{-pl} = \epsilon_c^{-in}$), gdje je plastična deformacija (ϵ_t^{-pl}) jednaka deformaciji pucanja (ϵ_t^{-ck}) za vlačno ukrućivanje, dok je plastična deformacija (ϵ_c^{-pl}) jednaka neelastičnoj deformaciji (ϵ_c^{-in}) za tlačno otvrdnjavanje.



Slika 13. Krivulja naprezanja i deformacije u modelu CDP prema [39]: a) vlak; b) tlak

Tablica 3. Parametri materijala za oštećenje betona pri plastifikaciji

Kut širenja	Ekscentričnost	f_{bo}/f_{co}	K	Parametar viskoznosti
1,0	1,0	1,16	0,6667	0,004

Beton i armatura ne modeliraju se zasebno jer je u ovom radu istaknut utjecaj ispune na AB okvir. Oni se zbog jednostavnosti u ovom proračunu modeliraju kao homogeni pojedinačni materijal. Interakcija ispune i okolnog okvira modelira se pomoću površinskog kohezijskog ponašanja. Ta vrsta interakcije primjenjuje se za modeliranje odvajanja u spoju, a prema zakonu naprezanja - razdvajanja. U model naprezanja - razdvajanja, linearnoelastično ponašanje se dopušta do početnog oštećenja. Podloga okvira modelirana je kao fiksna podloga, pa na okvir ne djeluje opterećenje zbog sile teže. Opterećenje se nanosi bočno na površinu poprečnog presjeka grede.

Kako na modeliranje utječu različiti parametri, postupak verifikacije ne može se smatrati jednostavnim zadatkom. Ipak, rezultati eksperimentalnih ispitivanja omogućili su jednostavnije baždarenje tijekom proračuna FEA.

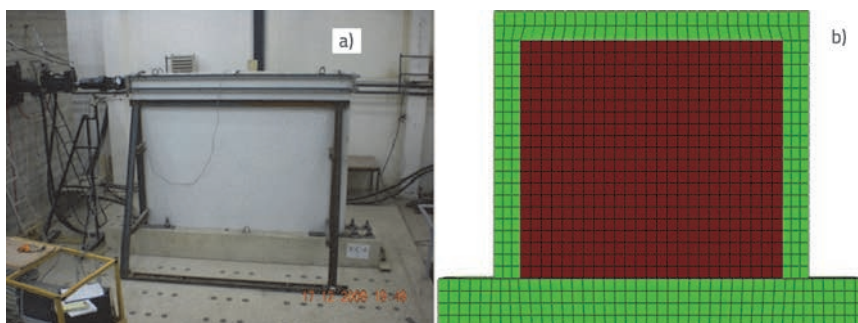
4. Rezultati proračuna konačnih elemenata

U ovom se radu izračunavaju i modeliraju jednokatni AB okviri s jednim poljem za slučaj bočnog opterećenja, a u tu se svrhu koristi nelinearna metoda konačnih elemenata (FEM). Primjenjuju se dvije vrste zidane ispune: ispuna od plinobetonskih blokova i ispuna od opeke. Mehanizam eksperimentalnih ispitivanja za slučaj AB okvira s ispunom prikazan je na slici 14.

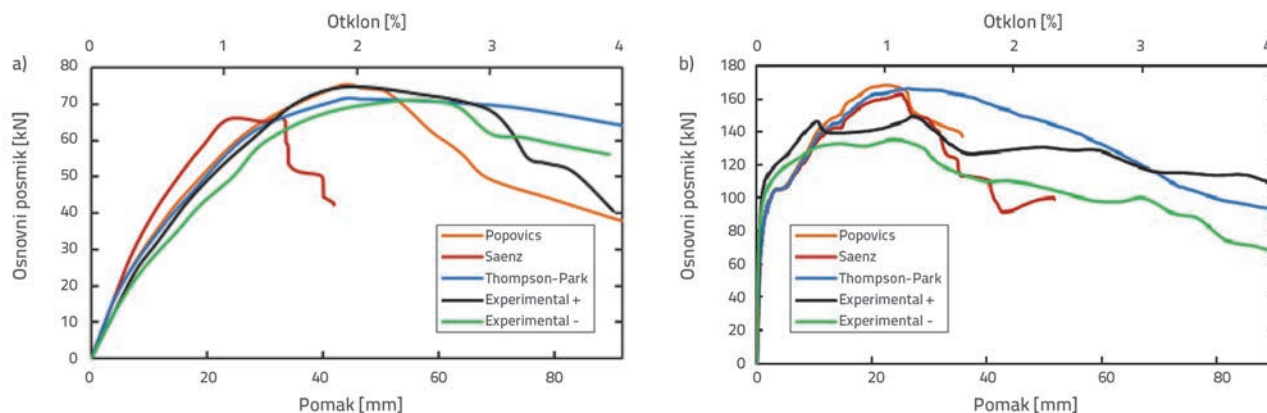
Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata za okvir bez ispune prikazana je na slici 15.a u obliku krivulje ukupne posmične sile i pomaka na vrhu. Eksperimentalni rezultati su prikazani u oba smjera. Drugim riječima, smjer negativnih rezultata također je ucrtan na

pozitivnoj strani slike. Pri korištenju Thompsonovog i Parkovog modela uočena je dobra podudarnost eksperimentalnih i numeričkih rezultata do graničnog bočnog opterećenja, i to kako za pozitivni tako i za negativni smjer. Približna vrijednost početne krutosti određena je Saenzovim modelom. Taj model naglo popušta pri pomaku od 40 mm uz otklon od gotovo 2 %. Ponašanje nakon vršnog opterećenje nije se moglo registrirati na numeričkim modelima, ali su rezultati bili zadovoljavajući kada je korišten Popovicsev model [35]. Rezultati dobiveni proračunom FEA za AB okvire s ispunom od plinobetonskih blokova uspoređeni su s eksperimentalnim rezultatima (slika 15.b). Može se uočiti kompatibilnost eksperimentalnih i numeričkih rezultata. Potrebno je napomenuti da se početna krutost sustava može definirati za sva tri modela primjenom nelinearnog proračuna konačnih elemenata. Kapacitet nosivosti okvira s ispunom iznosi otprilike 150 kN kod eksperimentalnih ispitivanja pri pomaku od 28 mm, tj. 170 kN za numeričke proračune pri pomaku od 22 mm. S druge strane, kapacitet nosivosti na bočno opterećenje definiran nelinearnim proračunom odstupa od eksperimentalnih rezultata i to za 8-10 % kod svih modela. Pretpostavlja se da je ta razlika uvjetovana naglim padom krivulje naprezanja i deformacije kod izračunanih modela.

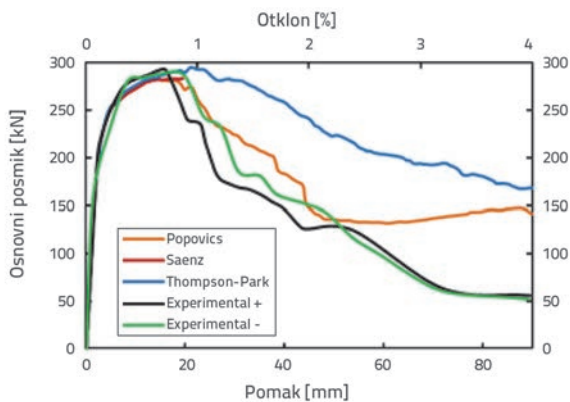
Rezultati za odnos sile i pomaka dobiveni proračunom FEA za AB okvire s ispunom od opeke uspoređeni su s rezultatima eksperimentalnih ispitivanja (slika 16.). Očito je da se eksperimentalni i FEA rezultati podudaraju sve do dostizanja vrijednosti graničnog opterećenja sustava kod tri modela



Slika 14. AB okvir s ispunom: a) eksperimentalni model; b) numerički model



Slika 15. Eksperimentalni i numerički prikaz: a) AB okvira bez ispune; b) AB okvira s ispunom od plinobetonskih blokova



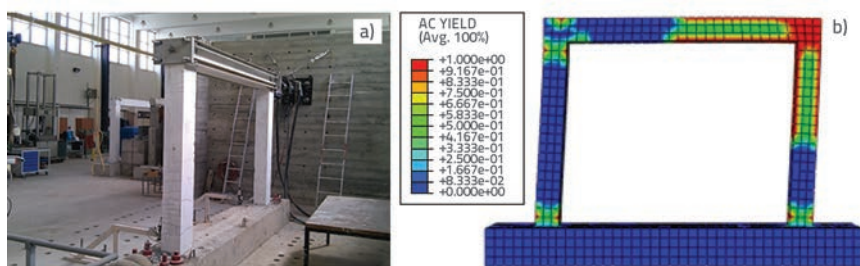
Slika 16. Usporedba eksperimentalnih i analitičkih rezultata za AB okvir s ispunom od opeke

betona. Nakon te točke, Saenzov model popušta zbog naglog pada režima omekšanja u krivulji naprezanja i deformacija za taj model. S druge strane, Popovicev i Thompsonov model razlikuje se od Park-ovog modela, a oba odstupaju od eksperimentalnih rezultata nakon graničnog bočnog opterećenja, iako treba napomenuti da su rezultati Popovicsova modela bliži eksperimentalnim rezultatima.

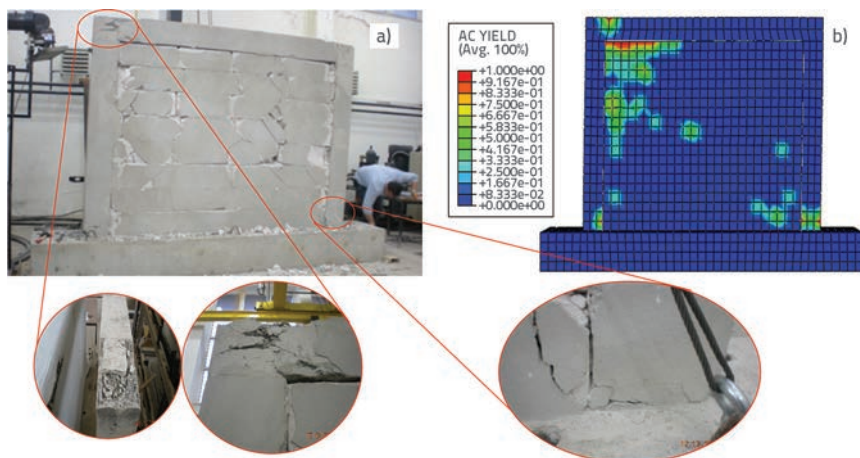
Detaljne informacije o vrstama popuštanja AB okvira s ispunom mogu se naći u odgovarajućoj literaturi. U ovom se radu razmatra samo popuštanje AB okvira. Do popuštanja okvira općenito dolazi u obliku plastičnih zglobova na stupovima i na spoju stupova i greda. Ovdje su prikazani samo numerički rezultati Popovicseva modela jer taj model vjernije prati rezultate eksperimentalnih ispitivanja. Vrste popuštanja na okvirima bez ispane prikazane su na slici 17. za eksperimentalna ispitivanja i

numerički proračun. Tu se jasno vidi da do popuštanja dolazi na vrhu i dnu stupova i na spoju stupova, i greda i to ne samo u eksperimentalnim ispitivanjima nego i u numeričkom proračunu. Pretjerano oštećenje desnog spoja grede i stupa registrirano je kod većeg bočnog pomaka. Slika 18. prikazuje vrste sloma okvira na temelju eksperimentalnih i analitičkih rezultata za AB okvir s ispunom od plinobetonskih blokova. Na slici se jasno vidi da su se plastični zglobovi, koji se mogu uočiti na spojevima stupa i grede, isto tako pojavili i pri nelinearnom proračunu konačnih elemenata. S druge strane, kako je ispuna modelirana kao kruti element, ne mogu se vidjeti vrste sloma koje su se dogodile u pojedinačnim elementima ili u mortu, dok je utjecaj ispane na okvir predstavljen precizno, kao što je prikazano na slikama 15. i 16. Iz proračuna se može uočiti da se eksperimentalna ispitivanja mogu adekvatno predvidjeti pomoću razvijenog numeričkog modela.

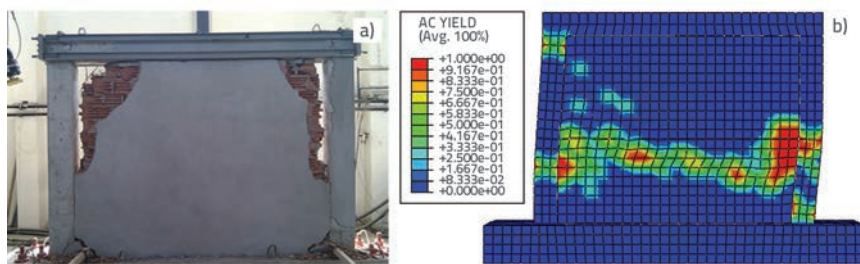
Slika 19. prikazuje vrste slomova okvira na temelju eksperimentalnih i analitičkih rezultata za AB okvir s ispunom od opeke. Kod eksperimentalnog ispitivanja AB okvira s ispunom od opeke uočen je slom uslijed popuštanja u kutu ispane, a plastični zglobovi otkriveni su na vrhu i dnu stupova i na spojevima stupova i greda. Na slici se vidi da su se plastični zglobovi formirali, prema rezultatima eksperimentalnih ispitivanja, u blizini spojeva između greda i stupova te na dnu stupova. S druge strane, prema numeričkom proračunu, plastični



Slika 17. Vrste popuštanja kod AB okvira bez ispane: a) eksperimentalnih; b) numeričkih



Slika 18. Vrste eksperimentalnih i numeričkih popuštanja AB okvira s ispunom od plinobetonskih blokova



Slika 19. Vrste popuštanja kod AB okvira s ispunom od opeke: a) eksperimentalnih; b) numeričkih

zglobovi su se formirali gotovo na istim mjestima kao i kod eksperimentalnih ispitivanja, s tim da su se oštećenja pojavila blizu sredine stupova i na dnu i na vrhu. Međutim, unatoč plastičnom oštećenju oko sredine stupova, globalno ponašanje točno je iskazano, kao što se to zorno vidi na slici 19. Na toj slici i ispitivanja i proračuni pokazuju da donje područje ispune sprečava bočne pomake okvira, dok se u gornjem području javljaju oštećenja zbog prevelikog pomaka.

5. Zaključak

U radu se analizira kompatibilnost i učinkovitost triju različitih modela betona (Thompson-Parkov, Popovicsev i Saenzov) koji se često spominju u literaturi. Proračun je proveden simulacijom AB okvira s ispunom pod bočnim opterećenjem. S druge strane, površinsko kohezijsko ponašanje, koje se definira kao interakcijsko svojstvo površina, koristi se za modeliranje ponašanja naprezanja i odvajanja na spoju.

Rezultati dobiveni nelinearnim proračunom konačnih elemenata pokazuju da se jednako točna predviđanja mogu postići primjenom različitih matematičkih modela za armirani beton. Međutim, usporedba s eksperimentalnim rezultatima ovisi o mnogim parametrima koji se odnose na čvrstoću, količinu armature itd. Matematički modeli korišteni u proračunu odlikuju se prikladnom podudarnošću sve do

graničnog opterećenja sustava. Za predviđanje ponašanja betona nakon vršnog opterećenja ipak je potrebna detaljnija analiza. U zaključku se može ustvrditi da ponašanje nakon vršnog opterećenja ovisi o režimu omekšanja matematičkog modela, jer je ponašanje nakon vršnog opterećenja u velikoj mjeri povezano s ponašanjem okvira nakon postizanja graničnog opterećenja. Čini se da je Thompson-Parkov model najprikladniji za AB okvir bez ispune i za AB okvir s ispunom od plinobetonkih blokova. Međutim, Popovicsevovim modelom postižu se realniji rezultati za AB okvir s ispunom od plinobetonkih blokova.

Dobiveni rezultati također pokazuju da površinsko kohezijsko ponašanje može realno predstavljati interakciju ispune i okvira. Osim toga, rezultati proračuna konačnih elemenata pokazuju da se numeričkim modelom može procijeniti nosivost AB okvira s ispunom. Također se tako može registrirati oblik popuštanja u okvirima kao što su plastični zglobovi. Međutim, ipak se treba provesti detaljnije mikromodeliranje kako bi se registrirali oblici popuštanja i razvoj pukotina u ispuni.

Autori predlažu pažljiv odabir modela betona te provedbu detaljne parametarske studije kako bi se postigli točniji rezultati proračunom konačnih elemenata. Za daljnja istraživanja, proračun bi se trebao proširiti provedbom dodatnih eksperimentalnih ispitivanja, uključujući i neke druge modele kao što su Manderov model te ostali prikladni modeli.

LITERATURA

- [1] Dogangun, A.: *Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı* (11 Edition), Birsen yayınevi, 2014.
- [2] Asteris, P.G.: Finite element micro-modelling of infilled frames. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 8 (2008) 8, pp. 1-11.
- [3] Bachmann, H.S.: *Seismic conceptual design of buildings: basic principles for engineers, architects, building owners, and authorities*. SDC. 2003.
- [4] Bayülke, N.: *Betonarme yapının dolgu duvari*. Türkiye Mühendislik Haberleri, pp. 85-98, 2003.
- [5] Mehrabi, A.B., Shing, P.B.: Finite Element Modelling of Masonry-Infilled RC frames. *Journal of Structural Engineering-ASCE*, 123 (1997) 5, pp. 604-613.
- [6] Ghosh, A.K., Asce, M., Amde, A.M., Asce, F.: Finite Element Analysis of Infilled Frames, *Journal of Structural Engineering*, 128 (2002) 7, pp. 881-889, <https://doi.org/10.1061/ASCE0733-94452002128:7881>
- [7] Al-Chaar, G.K., Mehrabi, T.M.: Finite Element Interface Modelling and Experimental Verification of Masonry-Infilled R/C Frames, *TMS Journal*, 30 (2008) 1.
- [8] Kose, M.M.: Parameters affecting the fundamental period of RC buildings with infill walls, *Engineering Structures*, 31 (2009) 1, pp. 93-102, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.07.017>
- [9] Stavridis, A., Shing, P.B.: Finite-Element Modelling of Nonlinear Behaviour of Masonry-Infilled RC Frames, *Journal of Structural Engineering*, 136 (2010) 3, pp. 285-296, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.116](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.116)
- [10] Resta, M., Fiore, A., Monaco, P.: Non-Linear Finite Element Analysis of Masonry Towers by Adopting the Damage Plasticity Constitutive Model, *Advances in Structural Engineering*, 16 (2013) 5, pp. 791-803, <https://doi.org/10.1260/1369-4332.16.5.791>
- [11] Kuang, J.S., Yuen, Y.P.: Simulations of masonry-infilled reinforced concrete frame failure, *Proceedings of the ICE - Engineering and Computational Mechanics*, 166 (2013) 4, pp. 179-193, <https://doi.org/10.1680/eacm.13.00002>
- [12] Asteris, P.G., Cotsovos, D.M., Chrysostomou, C.Z., Mohebbkhan, A., Al-Chaar, G.K.: Mathematical micromodelling of infilled frames: State of the art, *Engineering Structures*, 56 (2013), pp. 1905-1921, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.08.010>
- [13] Caliò, I., Pantò, B.: A macro-element modelling approach of Infilled Frame Structures, *Computers & Structures*, 143 (2014), pp. 91-107, <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2014.07.008>
- [14] Cavaleri, L., Di Trapani, F.: Cyclic response of masonry infilled RC frames: Experimental results and simplified modelling, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 65 (2014), pp. 224-242, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.06.016>
- [15] Asteris, P.G., Repapis, C.C., Tsaris, A.K., Di Trapani, F., Cavaleri, L.: Parameters affecting the fundamental period of infilled RC frame structures, *Earthquakes and Structures*, 9 (2015) 5, pp. 999-1028, <https://doi.org/10.12989/eas.2015.9.5.999>

- [16] Di Trapani, F., Macaluso, G., Cavaleri, L., Papia, M.: Masonry infills and RC frames interaction: literature overview and state of the art of macromodelling approach, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 19 (2015) 9, pp. 1059-1095, <https://doi.org/10.1080/19648189.2014.996671>
- [17] Campione, G., Cavaleri, L., Macaluso, G., Amato, G., Di Trapani, F.: Evaluation of infilled frames: an updated in-plane-stiffness macro-model considering the effects of vertical loads, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13 (2015) 8, pp. 2265-2281, <https://doi.org/10.1007/s10518-014-9714-x>
- [18] Asteris, P.G., Cavaleri, L., Di Trapani, F., Sarhosis, V.: A macro-modelling approach for the analysis of infilled frame structures considering the effects of openings and vertical loads, *Structure and Infrastructure Engineering*, 12 (2016) 5, pp. 551-566, <https://doi.org/10.1080/15732479.2015.1030761>
- [19] Pantò, B., Caliò, I., Lourenço, P.B.: Seismic safety evaluation of reinforced concrete masonry infilled frames using macro modelling approach, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2017, <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0120-z>
- [20] Faraji Najarkolaie, K., Mohammadi, M., Fanaie, N.: Realistic behaviour of infilled steel frames in seismic events: experimental and analytical study, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15 (2017) 12, pp. 5365-5392, <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0173-z>
- [21] Dautaj, A.D., Kadiri, Q., Kabashi, N.: Experimental study on the contribution of masonry infill in the behaviour of RC frame under seismic loading, *Engineering Structures*, 165 (2018) March, pp. 27-37, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.03.013>
- [22] Nasiri, E., Liu, Y.: Development of a detailed 3D FE model for analysis of the in-plane behaviour of masonry infilled concrete frames, *Engineering Structures*, 143 (2017), pp. 603-616, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.04.049>
- [23] Hak, S., Morandi, P., Magenes, G.: Prediction of inter-storey drifts for regular RC structures with masonry infills based on bare frame modelling, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16 (2018) 1, pp. 397-425, <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0210-y>
- [24] Morandi, P., Hak, S., Magenes, G.: Performance-based interpretation of in-plane cyclic tests on RC frames with strong masonry infills, *Engineering Structures*, 156 (2018), pp. 503-521.
- [25] Noh, N.M., Liberatore, L., Mollaioli, F., Tesfamariam, S.: Modelling of masonry infilled RC frames subjected to cyclic loads: State of the art review and modelling with OpenSees, *Engineering Structures*, 150 (2017), pp. 599-621, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.07.002>
- [26] Zhou, X., Kou, X., Peng, Q., Jintao, C.: Influence of Infill Wall Configuration on Failure Modes of RC Frames, *Shock and Vibration*, 2018, <https://doi.org/10.1155/2018/6582817>
- [27] Kakaletsis, D.J., Karayannis, C.G.: Experimental investigation of infilled reinforced concrete frames with openings, *ACI Structural Journal*, 106 (2009) 2, pp. 132-141, <https://doi.org/10.14359/56351>
- [28] Akhoundi, F., Lourenço, P.B., Vasconcelos, G.: Numerically based proposals for the stiffness and strength of masonry infills with openings in reinforced concrete frames, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 45 (2016) 6, pp. 869-891, <https://doi.org/10.1002/eqe.2688>
- [29] Sigmund, V., Penava, D. Influence of openings, with and without confinement, on cyclic response of infilled r-c frames - an experimental study, *Journal of Earthquake Engineering*, 18 (2014) November, pp. 113-146, <https://doi.org/10.1080/13632469.2013.817362>
- [30] Asteris, P.G., Cavaleri, L., Di Trapani, F., Tsaris, A.K.: Numerical modelling of out-of-plane response of infilled frames: State of the art and future challenges for the equivalent strut macromodels, *Engineering Structures*, 132 (2017), pp. 110-122, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.10.012>
- [31] Cervenka, V., Jendele, L., Cervenka, J.: ATENA program documentation, Part 1: Theory, Cervenka Consulting, Prague, 2007.
- [32] Arslan, M.E.: Experimental and theoretical investigation of behaviour of in-filled RC frames strengthened with GFRP under cyclic loading, Doctoral dissertation, Karadeniz Technical University, 2013.
- [33] Bayraktar, A., Altunişik, A.C., Sevim, B., Türker, T.: Seismic response of a historical masonry minaret using a finite element model updated with operational modal testing, *JVC/Journal of Vibration and Control*, 17 (2011) 1, pp. 129-149, <https://doi.org/10.1177/1077546309353288>
- [34] Timurağaoğlu, M.Ö., Livaoğlu, Ramazan Doğangün, A.: Investigation of the infill wall effect on the dynamic behaviour of RC frames, 6th International Operational Modal Analysis Conference, No:1901649, pp. 505-511, 2015.
- [35] Popovics, S.: A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete, *Cement and Concrete Research*, 3 (1973) 5, pp. 583-599, [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(73\)90096-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(73)90096-3)
- [36] Saenz, L.P.: Discussion of Equation for the stress-strain curve of concrete by Desayi P, Krishnan S., *ACI Journal*, 61 (1964) 9, pp. 1229-1235.
- [37] Thompson, K.J., Park, P.: Moment-curvature behaviour of cyclically loaded structural concrete members, *Proceedings of Institution of Civil Engineers*, 69 (1980), pp. 317-341.
- [38] Lourenço, P.B.: Computations on historic masonry structures, *Prog. Struct. Engng Mater.*, 4 (2002) 3, pp. 301-319, <https://doi.org/10.1002/pse.120>
- [39] ABAQUS: ABAQUS Documentation, Dassault Systèmes, Providence, RI, USA, 2013.
- [40] Tao, Y., Chen, J.F., Stratford, T., Ooi, J.Y.: Numerical Modelling of a Large Scale Model Masonry Arch Bridge, In *Structural Faults and Repair*. Edinburgh, United Kingdom, 2012.
- [41] Moss, P.J., Carr, A.J. Aspects of the analysis of Frame-Panel Interaction, *Bulletin of the New Zealand National Society of Earthquake Engineering*, 4 (1971) 1, pp. 126-144.
- [42] Mohebbkhan, A., Tasnimi, A.A., Moghadam, H.A.: Nonlinear analysis of masonry-infilled steel frames with openings using discrete element method, *Journal of Constructional Steel Research*, 64 (2008) 12, pp. 1463-1472, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.01.016>