

NUMERIČKA I EKSPERIMENTALNA ANALIZA DINAMIČKOG ODGOVORA BLOKOVSKOG PORTALA S ELASTIČNIM VEZIVOM

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE DYNAMIC RESPONSE OF A BLOCKY PORTAL FRAME WITH ELASTIC JOINTS

Anđela Janković*, Mateo Ljubić*, Nina Čeh*, Leo Škec*

Sažetak

U radu se analizira dinamički odziv portalnog okvira sastavljenog od krutih blokova povezanih elastičnim vezivima. Razvijen je nelinearni numerički model temeljen na diskretnoj kinematici i implementiran u Pythonu, uz simulaciju odziva pomoću Newmarkove metode. Eksperimentalna ispitivanja provedena su radi validacije modela. Rezultati potvrđuju njegovu primjenjivost za analizu blokovskih sustava i pružaju osnovu za proširenje na nelinearno ponašanje spojeva.

Ključne riječi: *dinamička pobuda, portalni okvir, numerički model, elastična veziva, blokovski sustavi*

Abstract

This paper investigates the dynamic response of a block-based portal frame with elastic joints. A nonlinear numerical model based on discrete kinematics was developed and implemented in Python using the Newmark method. Experimental tests were conducted to validate the model. Results confirm its suitability for analyzing block systems and form a basis for future extension to nonlinear joint behavior.

Key words: *dynamic excitation, portal frame, numerical model, elastic joints, block systems*

* Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka

E-mail: {ajankovic2,mljubic1}@student.uniri.hr, {nina.ceh, leo.skec}@gradri.uniri.hr

1. Uvod

Ponavljajuća pojava potresa i njihove razorne posljedice na građevinske sustave predstavljaju jedan od ključnih izazova suvremenog građevinarstva. Analiza ponašanja konstrukcija pod dinamičkim opterećenjima stoga je od presudne važnosti, osobito u kontekstu projektiranja sustava povećane otpornosti i stabilnosti. Posebnu ranjivost pri seizmičkim djelovanjima pokazuju konstrukcije sastavljene od krutih blokova povezanih trenjem ili vezivima, što je karakteristično za brojne povijesne građevine zidane tradicionalnim tehnikama [1, 2]. Takvi sustavi, za razliku od onih potpuno nepovezanih, kod kojih se energija disipira kroz ljuljanje blokova [3, 4], mogu doživjeti značajne deformacije u vezivima koja privremeno povezuju elemente. Tek nakon popuštanja veziva sustav prelazi u ponašanje karakteristično za diskretne blokove koji se ljuljaju. Jedan od ključnih problema kod takvih konstrukcija je gubitak učinkovitosti spojeva tijekom potresa, što može rezultirati znatnim pomacima, rotacijama ili čak potpunim urušavanjem dijelova sustava. U cilju boljeg razumijevanja takvog ponašanja, nužno je razvijati računalne modele koji pouzdano opisuju mehaniku kontakta između blokova te omogućuju analizu odziva konstrukcija pri dinamičkim pobudama. Osobit interes pritom izazivaju sustavi s elastičnim vezivima između blokova, koji omogućuju određeni stupanj deformabilnosti i disipacije energije, a istovremeno zadržavaju diskontinuirani karakter konstrukcije.

Postojeći modeli za analizu ponašanja zidanih konstrukcija se uglavnom baziraju na metodi konačnih elemenata (FEM) [5–7] ili metodi diskretnih elemenata (DEM) [8–11], dok se noviji modeli koriste kombinacijom FEM i DEM metode [12]. Portalne konstrukcije, sastavljene od blokova koji čine dva vertikalna stupca povezana blokovima koji čine horizontalni element koji stupce povezuje, analizirane su numerički upravo upotrebom kombinirane FEM-DEM metode [13] i eksperimentalno [14, 15].

U ovom radu istražuje se dinamički odziv jednostavnog portalnog okvira sastavljenog od triju krutih blokova – dvaju stupova i grede – međusobno i s podlogom povezanih elastičnim vezivom. Sustav je modeliran s devet stupnjeva slobode, uzimajući u obzir translacijska i rotacijska gibanja svakog pojedinog bloka u ravnini. Razvijen je numerički model temeljen na principima diskretne mehanike, implementiran u programskom jeziku Python, s ciljem simulacije odziva pomoću Newmarkove metode vremenske integracije. Model uključuje formulaciju jednadžbi gibanja i definiciju karakteristika elastičnih spojeva putem

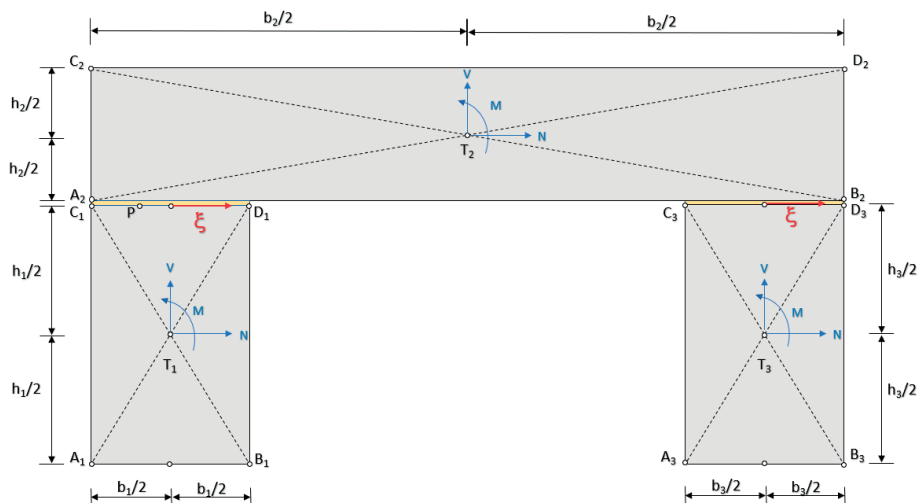
pripadajućih krutostnih matrica. Valjanost modela potvrđena je eksperimentalnim ispitivanjima provedenim u kontroliranim laboratorijskim uvjetima, u kojima su ispitana mehanička svojstva silikonskog veziva te odziv fizičkog modela portala na zadane dinamičke pobude. Dobiveni rezultati omogućuju kalibraciju modela i predstavljaju temelj za njegovu daljnju nadogradnju, uključujući modeliranje nelinearnog ponašanja veziva u cilju preciznijeg predviđanja ponašanja konstrukcija izloženih seizmičkim djelovanjima.

2. Računski model

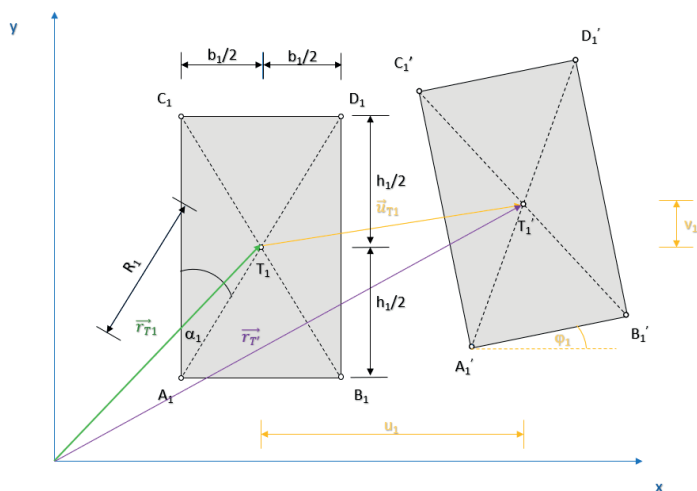
Računski model prikazan na Slici 1 predstavlja portal sastavljen od tri bloka koji su međusobno, ali i s podlogom, povezani elastičnim kontaktom. Blokovi 1 i 3 imaju funkciju stupova u portalu, dok je blok 2 nadvratnik. Svaki od blokova može u svom težištu preuzeti horizontalne i vertikalne sile te momente. U ovom radu analizirat će se kinematika pojedinih blokova, uvođenje elastične veze između blokova koji su povezani međusobno, kao i između samih blokova koji su u kontaktu. Određivanjem matrice krutosti sustava dobivene su vrijednosti vektora pomaka. Dobivene vrijednosti pomaka ovisit će o karakteristikama elastičnih veza te o vanjskim djelovanjima na blokove. Prije uvođenja elastične veze između donje površine bloka i podloge, provodi se analiza kinematike bloka. U sklopu te analize određuju se početni i pomaknuti položaj bloka, a zatim se uspostavlja veza između pomaka težišta i vrhova bloka, koji nastaju uslijed djelovanja vanjskih sila. Ti pomaci prikazuju se vektorom pomaka, koji uključuje translacijske i rotacijske komponente između dva položaja krutog tijela. Na temelju toga izvodi se jednadžba gibanja sustava i definira postupak njezinog numeričkog rješavanja.

2.1 Kinematičke jednadžbe

U mehanici se krutim tijelom smatra tijelo koje tijekom gibanja ne mijenja svoju geometriju niti volumen, odnosno kod kojeg udaljenosti između točaka unutar tijela ostaju konstantne. Gibanja krutog tijela definirana su kao kombinacija translacije i rotacije tijela [3,4]. U ravnini x - y , kinematika krutog tijela opisana je s tri stupnja slobode: dva translacijska pomaka u (u smjeru osi x) i v (u smjeru osi y) te rotacijom φ (oko osi z). Težište pravokutnog bloka u početnom položaju definirano je vektorom položaja $\vec{r}_T$. Kada se tijelo pomakne, novi položaj težišta opisan je vektorom $\vec{r}_T'$, koji je zbroj vektora početnog položaja $\vec{r}_T$ i vektora pomaka $\vec{u}_T$ (vidi Sliku 2).



Slika 1. Računski model sastavljen od tri bloka



Slika 2. Početni (\$T_1\$) i novi (\$T_1'\$) položaj težišta krutog bloka 1

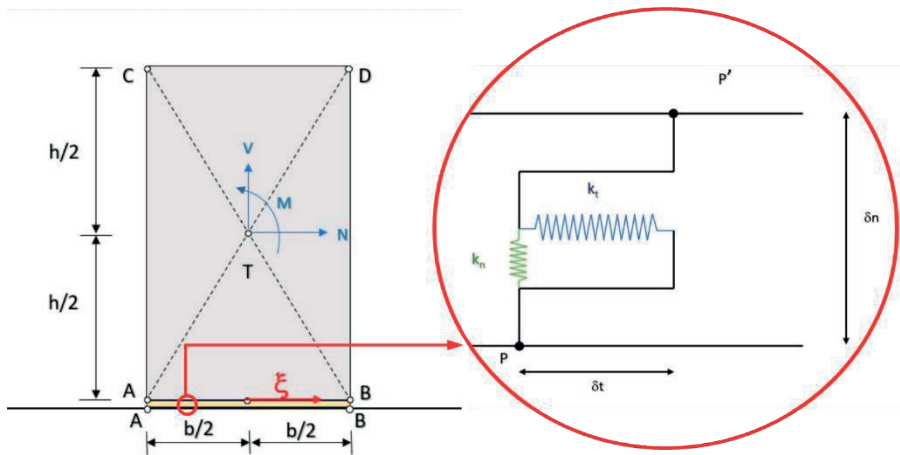
Za potrebe analize, za svaki blok potrebno je zapisati komponente vektora pomaka svih uglova bloka (A, B, C i D) u funkciji poznatih veličina: horizontalnog i vertikalnog pomaka težišta u_i i v_i , rotacijske komponente

φ_i , te geometrijskih parametara (visine i širine), pri čemu se indeks i odnosi na blok i . U slučaju malih rotacija pretpostavljamo $\sin \varphi_i \approx \varphi_i$ i $\cos \varphi_i \approx 1$, pa konačni izrazi za pomake uglova bloka glase:

$$\begin{aligned} u_{Ai} &= u_i + \frac{h_i}{2} \cdot \varphi_i, v_{Ai} = v_i - \frac{b_i}{2} \cdot \varphi_i, \\ u_{Bi} &= u_i + \frac{h_i}{2} \cdot \varphi_i, v_{Bi} = v_i + \frac{b_i}{2} \cdot \varphi_i, \\ u_{Ci} &= u_i - \frac{h_i}{2} \cdot \varphi_i, v_{Ci} = v_i - \frac{b_i}{2} \cdot \varphi_i, \\ u_{Di} &= u_i - \frac{h_i}{2} \cdot \varphi_i, v_{Di} = v_i + \frac{b_i}{2} \cdot \varphi_i. \end{aligned} \quad (1)$$

2.2 Modeliranje veziva

Elastični kontakt između bloka i podloge modelira se kao niz linearno-elastičnih opruga čija je krutost definirana normalnom (k_n) i tangencijalnom (k_t) komponentom (vidi Sliku 3).



Slika 3. Linearno-elastični model veziva s normalnom (k_n) i tangencijalnom (k_t) krutosti. Uvećani detalj prikazuje sustav s horizontalnim i vertikalnim oprugama.

Relativni pomaci točaka kontakta u normalnom (δ_n) i tangencijalnom (δ_t) smjeru uzduž širine elastičnog sloja ovise o pomacima i rotaciji bloka te o lokalnoj koordinati ξ elastičnog kontakta koja se mjeri od sredine kontakta udesno ($\xi \in [-\frac{b}{2}, \frac{b}{2}]$). Vektor relativnih pomaka na kontaktu $\delta = [\delta_t \ \delta_n]^T$ može se zapisati kao:

$$\delta(\xi) = B(\xi) \cdot u, \quad (2)$$

gdje je

$$B(\xi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{h}{2} & 0 & 1 & \xi \end{bmatrix}, \quad (3)$$

transformacijska matrica dok je $u = [u \ v \ \varphi]^T$.

Veza kontaktnih naprežanja i relativnih pomaka na kontaktu je linearno elastična [5], što se može zapisati kao:

$$\sigma(\xi) = S \cdot \delta(\xi), \quad (4)$$

gdje je

$$S = [k_t \ 0 \ 0 \ k_n], \quad (5)$$

konstitutivna matrica.

Ovakva definicija veze bloka s podlogom korist će se u ovom radu za modeliranje veza blokova 1 i 3 (stupova portala) s podlogom. Na sličan način može se definirati i veza između blokova 1 i 3 (stupova) s blokom 2 (nadvratnikom). Detaljni izvodi dani su u [5].

2.3 Rješenje statičkog problema jednog bloka povezanog s podlogom

Izjednačavanjem potencijalne energije deformacija pohranjene u vezivu i rada vanjskih sila [6] može se zapisati ravnotežna jednadžba statičkog problema jednog bloka povezanog s podlogom linearno-elastičnom vezom:

$$K \cdot u = f, \quad (6)$$

gdje je

$$K = d \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} B(\xi)^T \cdot S \cdot B(\xi) d\xi, \quad (7)$$

matrica krutosti, a $f = [N \ V \ M]^T$ vektor vanjskog opterećenja koji sadrži horizontalnu (N) i vertikalnu silu (V) te koncentrirani moment (M) koji djeluju u težištu bloka (vidi Sliku 3). Detalji izvoda jednadžbi (6) i (7) dani su u [19].

2.4 Jednadžbe kretanja sustava

Uvođenjem dinamičkih sila i korištenjem drugog Newtonovog zakona, jednadžba (6) se proširuje dodavanjem matrice masa M i vektora ubrzanja bloka $\ddot{u}$, te poprima oblik:

$$M \cdot \ddot{u} + C \cdot \dot{u} + K \cdot u = f, \quad (8)$$

gdje je C matrica prigušenja koja predstavlja disipaciju energije tijekom dinamičke pobude, dok je $\dot{u}$ vektor brzine bloka. Matrica prigušenja C definirana je Rayleighjevim prigušenjem kao linearna kombinacija matrica mase i krutosti:

$$C = a_0 \cdot M + a_1 \cdot K, \quad (9)$$

pri čemu se koeficijenti a_0 i a_1 određuju na temelju koeficijenta prigušenja ζ i prirodnih frekvencija sustava ω za dva uzastopna tona slobodnih oscilacija j i $j + 1$ prema izrazima [7]:

$$a_0 = \zeta \cdot \frac{2\omega_j\omega_{j+1}}{\omega_j + \omega_{j+1}}, \quad (10)$$

$$a_1 = \zeta \cdot \frac{2}{\omega_j + \omega_{j+1}}. \quad (11)$$

Za rješavanje diferencijalne jednadžbe koristi se Newmarkova metoda numeričke integracije, koja se često primjenjuje u rješavanju problema dinamičkog odziva konstrukcija s više stupnjeva slobode, a pod utjecajem vremenski ovisnih sila [8]. Vremenska domena se diskretizira tako da se ukupno trajanje dinamičke analize podijeli na jednake vremenske intervale. Jednadžba kretanja sustava (8) zapisuje se za svaki vremenski trenutak t , čime se omogućuje određivanje pomaka i sila u svakom trenutku analize. Detalji oko rješavanja problema Newmarkovom metodom dani su u [5].

U slučaju kada sustav opterećujemo pobudom podloge (kao što je to slučaj kod potresa), jednadžbu gibanja kojom opisujemo dinamički problem možemo zapisati kao:

$$M \cdot \ddot{u}_{rel} + C \cdot \dot{u}_{rel} + K \cdot u_{rel} = -M \cdot \ddot{u}_b \cdot e, \quad (12)$$

gdje je u_{rel} relativni pomak bloka u odnosu na podlogu, u_b pomak podloge, a e je vektor istih dimenzija kao u koji je ispunjen nulama, a na mjestima horizontalnih pomaka ima jedinice. Dimenzije vektora i matrica ovise o broju blokova, pa tako za portal sastavljen od tri bloka imamo 9 stupnjeva slobode, što čitav problem čini numerički vrlo efikasnim. Kompletni

Python kod za simulaciju dinamičkog opterećenja portala dostupan je u [6].

3. Eksperimentalna ispitivanja

Kako bi se eksperimentalno odredile materijalne karakteristike elastičnog kontakta, provedena su ispitivanja pomoću drvenih blokova različitih dimenzija. Za ispitivanja posmika i tlaka korišteni su blokovi dimenzija 45×45×90 mm, dok su za ispitivanje vlaka korišteni blokovi dimenzija 30×60×120 mm. Na kontaktne površine blokova nanesen je sloj silikona debljine 2 mm te je ostavljen određeni period da očvrсне i uspostavi vezu s drvenim površinama. Nakon očvršćivanja silikona, na uglove i težišta blokova postavljene su samoljepljive točkice koje omogućuju optičko mjerenje pomaka tijekom ispitivanja. Pripremljeni uzorci zatim su izloženi djelovanju vanjskih sila koje izazivaju vlak, tlak i posmik, pri čemu se bilježe relativni pomaci i dijagrami sila i pomaka. Na temelju tih podataka određene su vrijednosti kontaktnih krutosti k_n i k_t , koje su zatim korištene u numeričkom modelu za simulaciju ponašanja blokovskog sustava. Dobivene krutosti omogućile su usporedbu eksperimentalnog ponašanja uzoraka s odgovorom koji daje računski model razvijen u Pythonu.

3.1 Opis opreme i eksperimentalnog postava

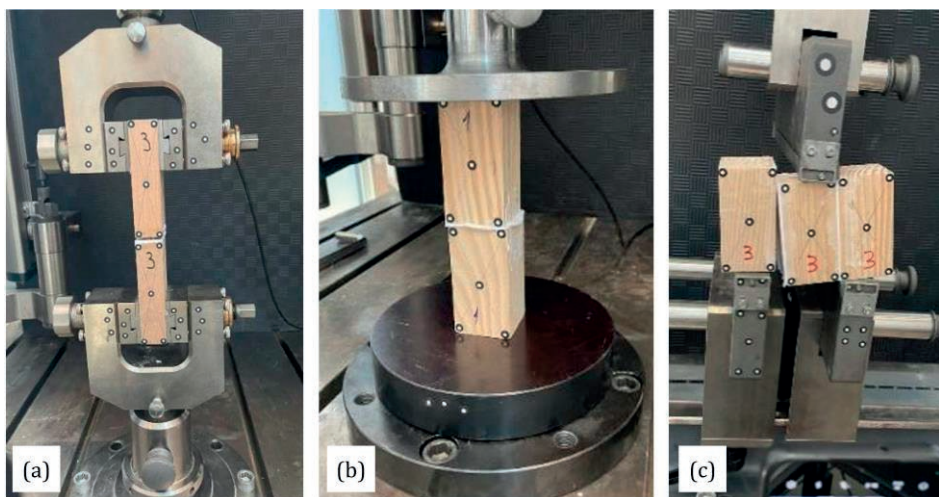
Prilikom ispitivanja korišten je univerzalni tlačno-vlačni stroj (kidalica) Z600 Zwick/Roell te sustav kamera za optička mjerenja (GOM/ZEISS mbH PONTOS 3D 4M) [9]. Radni prostor kidalice podijeljen je na prostor za vlačna ispitivanja, prostor za tlačna ispitivanja i prostor za ispitivanje na savijanje. Ispitivanja su provedena kontrolom pomaka. Drveni blokovi ugrađuju se na čeljusti za prihvat uzoraka te se ispituju, dok se podaci mjere i bilježe računalom putem softverskog paketa testXpert II. Portal sastavljen od tri bloka ispituje se na potresnu pobudu, a pomaci tijekom opterećenja mjere se sustavom kamera za optička mjerenja. Sustav se sastoji od dvije brze kamere koje omogućuju snimanje do 168 fps pri rezoluciji od 2400×1728 piksela te do 1300 fps u smanjenoj rezoluciji.

3.2 Provedena ispitivanja

Kako bi se utvrdile materijalne karakteristike silikona (k_n i k_t), provedena su ispitivanja na vlačna, tlačna i posmična naprezanja (Slika 4).

Sva ispitivanja izvedena su na tlačno-vlačnom stroju uz odgovarajuću prilagodbu prihvata uzoraka ovisno o vrsti ispitivanja.

Kod vlačnih ispitivanja, uzorci su opterećeni vlačnom silom koja nastoji razdvojiti blokove pridržane mehaničkim čeljustima (Slika 4(a)). Tlačna ispitivanja izvedena su nanošenjem aksijalne sile preko kružnih čeličnih ploča postavljenih na površinu blokova (Slika 4(b)). Tijekom posmičnih ispitivanja primijenjen je princip savijanja u tri točke, pri čemu je središnji blok istiskan u odnosu na dva vanjska bloka (Slika 4(c)).



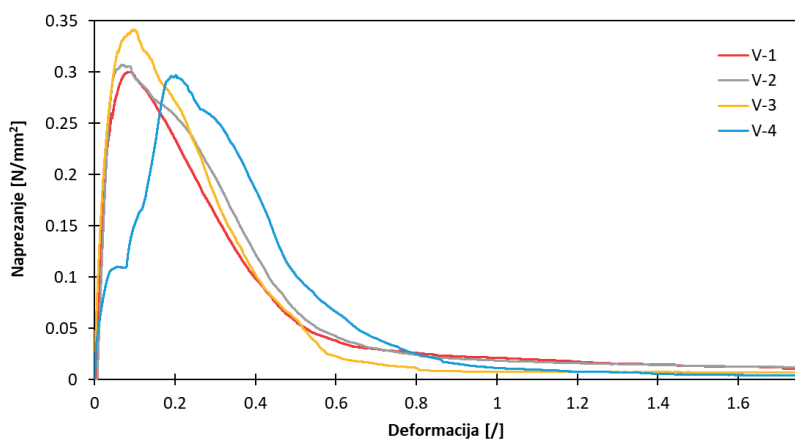
Slika 4. Ispitivanje na drvenim uzorcima: (a) vlak, (b) tlak i (c) posmik

Tijekom tlačnih ispitivanja uočeno je da se silikon istisnuo iz spoja, ali se nakon rasterećenja vratio u početni položaj bez odvajanja. S druge strane, vlačna ispitivanja izazvala su djelomično odvajanje silikona na kontaktnoj plohi, dok su posmična naprezanja uzrokovala potpuno odvajanje vanjskog bloka, što upućuje na popuštanje spoja. Odvajanje silikona od drva može biti posljedica nedovoljno dobre pripreme kontaktne plohe ili prisutnosti smole u drvu, što negativno utječe na adheziju.

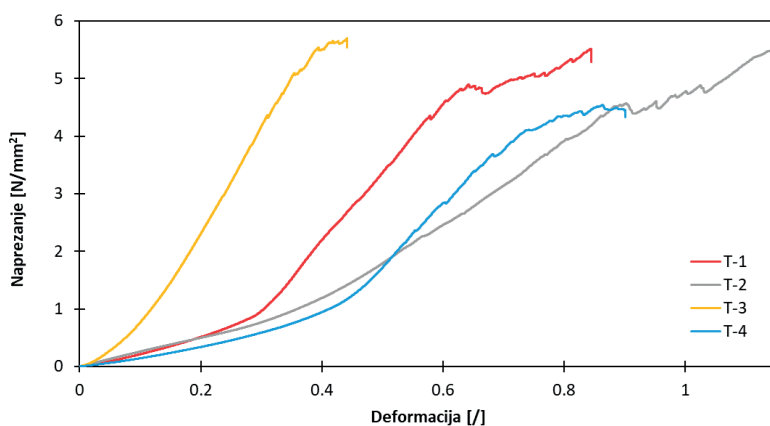
Na Slikama 5-7 prikazani su dijagrami naprezanje–deformacija za vlačne, tlačne i posmične testove, slijedom. Naprezanje σ dobiva se kao omjer izmjerene sile na kidalici i kontaktne površine, a deformacija ϵ kao omjer izmjerenog relativnog pomaka i početne debljine silikonskog sloja. Za svaki tip test ispitana su po 4 uzorka. Međutim, jedan uzorak iz vlačnog i jedan iz tlačnog ispitivanja izostavljeni su zbog znatnog odstupanja, dok su za posmična ispitivanja korišteni svi rezultati.

Kod vlačnih ispitivanja (Slika 5) može se uočiti strma linearna grana nakon koje nastupa omekšanje, odnosno postepeno oštećenje. Kod tlačnih ispitivanja (Slika 6) također je uočena početna linearna grana, ali nakon nje spoj pokazuje porast krutosti, što je posljedica nalijeganja jednog bloka na drugi.

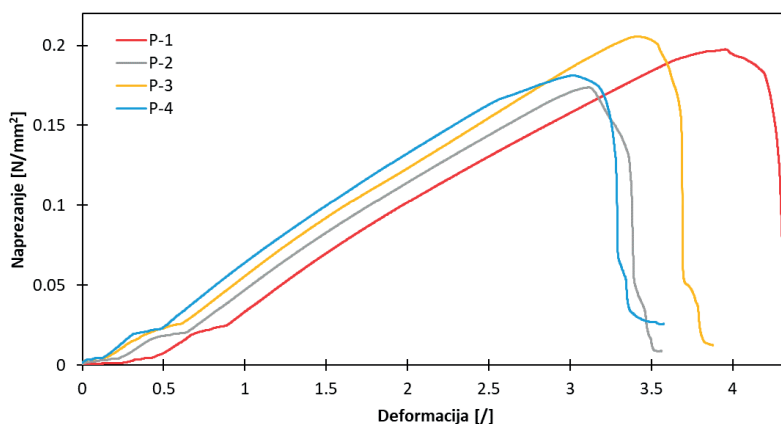
Kod posmika (Slika 7), nakon početne linearne grane dolazi do relativno naglog otkazivanja spoja. Na temelju ispitivanja može se zaključiti da ovaj tip silikona pokazuje znatne deformacije pod opterećenjem, čak i u linearno-elastičnom području. Takvo ponašanje je pogodno jer omogućuje lakše i točnije mjerenje pomaka u dinamičkim ispitivanjima.



Slika 5. Dijagram naprezanje-deformacija za vlačna ispitivanja



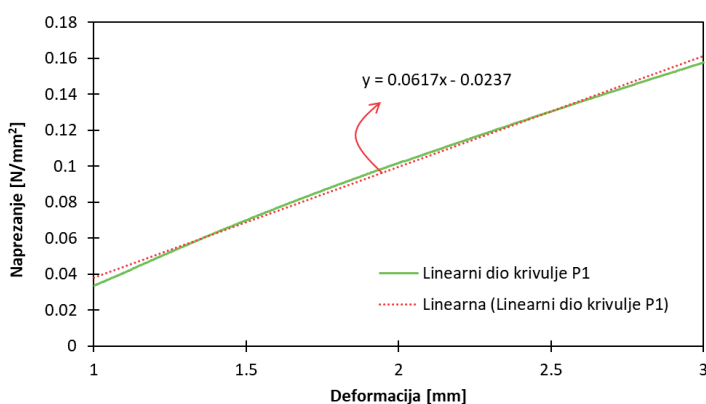
Slika 6. Dijagram naprezanje-deformacija za tlačna ispitivanja



Slika 7. Dijagram naprezanje-deformacija za posmična ispitivanja

Iz dobivenih dijagrama odabrani su linearni dijelovi koji opisuju ponašanje silikona u elastičnom području. Linearni dio aproksimiran je pravcem koristeći funkciju Linear Trendline u programu MS Excel, što je za primjer jednog ispitivanja prikazano na Slici 8.

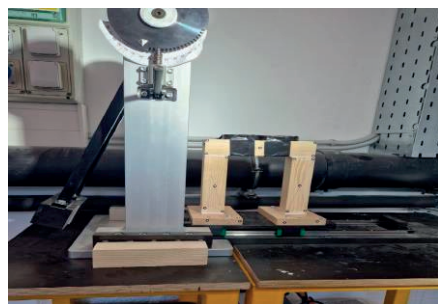
Nagib dobivenog pravca predstavlja modul elastičnosti, koji je zatim podijeljen s debljinom silikonskog sloja kako bi se dobile krutosti k_n i k_t . Normalna krutost $k_n = 3,07 \text{ N/mm}^3$ dobivena je kao srednja vrijednost rezultata vlačnih i tlačnih ispitivanja, dok je tangencijalna krutost $k_t = 0,03 \text{ N/mm}^3$ srednja vrijednost iz rezultata posmičnih ispitivanja.



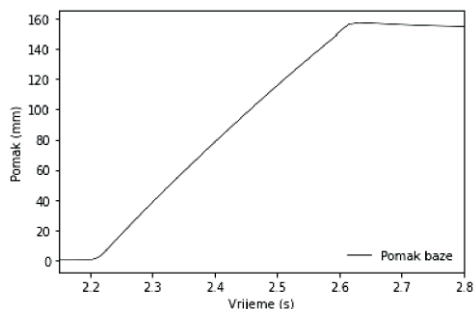
Slika 8. Aproksimacija linearnog dijela krivulje uzorka P1 pravcem

4. Rezultati i diskusija

Dinamički eksperiment portala sastavljenog od tri bloka, međusobno i s podlogom povezanih silikonom debljine 2 mm, proveden je na uređaju Roori-2 za nanošenje dvostrukog impulsnog opterećenja. Uređaj se sastoji od dijela koji služi za nanošenje impulsne sile, podloge koja je ujedno i klizni dio na koji je portal prihvaćen te odbojnika (Slika 9(a)). Nakon što je portal pričvršćen za kliznu podlogu, preko bata se nanosi impulsna sila te portal zajedno s kliznom podlogom klizi do odbojnika, gdje se događa drugi impuls sile. Pomaci i rotacije koje su se događale tijekom putanje portala po kliznoj plohi bilježile su se optičkom mjernom opremom opisanom u poglavlju 3.1. Kako bi se preciznije oscilacije blokova mogle preciznije optički snimiti, dodana je masa od 2 N na blok 2 (Slika 9(a)).



(a)



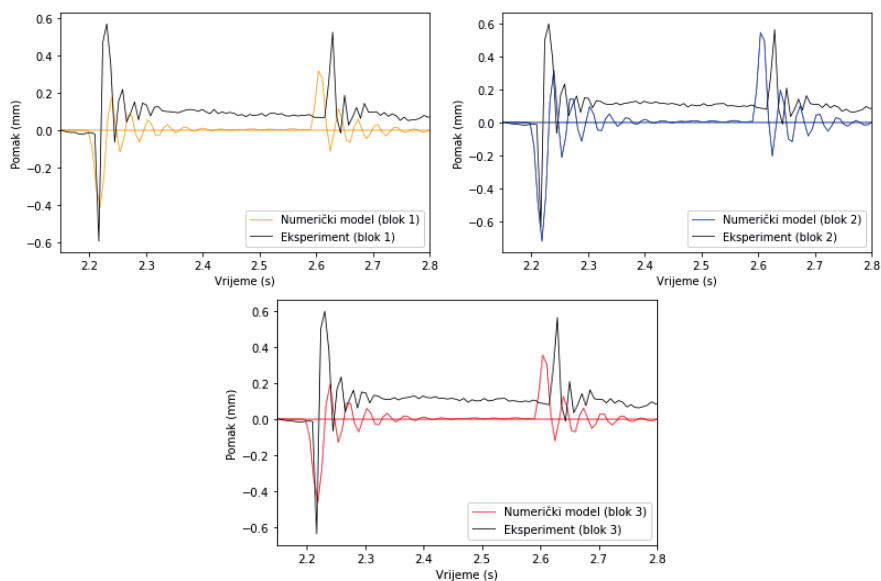
(b)

Slika 9. (a) Portal s dodanom masom korišten u dinamičkom eksperimentu, (b) dijagram pomaka podloge u vremenu tijekom nanošenja impulsne sile.

Promatrani su pomaci težišta svih blokova portala tijekom dinamičke pobude, pri čemu su za usporedbu numeričkog modela i eksperimenta korištene prosječna normalna tlačna krutost k_n i srednja vrijednost prigušenja ζ . Prigušenje sustava određeno je iz zasebnog ispitivanja slobodnih oscilacija korištenjem logaritamskog dekrementa amplituda, a iznosi $\xi = 0,137$. Za lakše razumijevanje prikaza dinamičkog odgovora, blokovi su označeni različitim bojama, dok su podaci eksperimenta u dijagramima prikazani crnom bojom.

Na Slici 10 prikazani su pomaci težišta blokova 1, 2 i 3 dobiveni numeričkim modelom i eksperimentom. Model zadovoljavajuće simulira stvarno ponašanje i amplitude pomaka. Primijećeno je da se impulsi u numeričkom modelu javljaju nešto ranije nego u eksperimentu, a

amplitude eksperimentalnih pomaka nisu zaglađene. Razlike u vremenu pojave impulsa mogu biti posljedica netočnosti optičkog mjernog sustava, koji rezultira šumom u izmjerenim pomacima baze. Ubrzanje uneseno u numerički model izračunava se kao dvostruka numerička derivacija izmjerenih podataka, što rezultira ne-fizikalnim skokovima u ubrzanjima i impulsima sile na samom početku, prije nego se oni pojavljuju u eksperimentu. Zbog nepravilnosti u mjerenju pomaka baze tijekom najbržih promjena, u dijagramu su korigirane pojedine točke kako bi se postigle glađe krivulje, no potrebno je dodatno filtrirati izmjerene podatke. Također, može se primijetiti da nakon prvog impulsa u eksperimentu imamo relativni pomak svih blokova u odnosu na bazu, što upućuje na to da je tijekom eksperimenta došlo do neželjenih pomaka (svega oko 0,15 mm) na prihvatu uzorka na bazu. To može biti posljedica zračnosti rupa koje su korištene za pričvršćenje uzorka na bazu ili gnječenja drva u okolini tih vijaka. Osim toga, numerički model se bazira samo na analizi ponašanja veziva samo u linearnom režimu, dok eksperimentalna ispitivanja pri djelovanju jakih impulsa mogu izazvati deformacije i naprezanja u vezivu koja izlaze iz domene linearno-elastičnog ponašanja.



Slika 10. Dijagram pomaka težišta bloka 1, 2 i 3 tijekom dinamičke pobude

5. Zaključak

U radu je uspješno razvijen i implementiran numerički model za analizu dinamičkog odziva blokovskog portalnog okvira s elastičnim kontaktnim vezama. Na temelju izvedenih jednadžbi gibanja, definiranih krutostnih matrica i karakteristika elastičnih spojeva, konstruiran je diskretni model s devet stupnjeva slobode, koji je implementiran u programskom jeziku Python koristeći Newmarkovu metodu vremenske integracije. Model uključuje geometrijsku konfiguraciju sustava, mehanička svojstva silikonskog veziva i globalne dinamike sustava.

Eksperimentalna ispitivanja provedena su u svrhu određivanja materijalnih parametara te validacije numeričkog modela. Usporedbom numeričkih i eksperimentalnih rezultata dobiven je zadovoljavajući stupanj podudarnosti, pri čemu su zabilježena određena odstupanja koja se u okviru ovog istraživanja nisu detaljno razmatrala. Unatoč tome, model pokazuje dostatnu razinu točnosti za pouzdanu simulaciju odziva portala izloženog dinamičkim pobudama.

Postignut je glavni cilj rada – razvoj validiranog numeričkog alata za analizu blokovskih sustava s elastičnim vezama, koji može poslužiti kao temelj za daljnja istraživanja. Budući razvoj modela usmjerit će se na uključivanje nelinearnih efekata u spojevima, analizu različitih geometrijskih konfiguracija i razvoj kriterija za procjenu graničnih stanja stabilnosti i oštećenja pri kompleksnijim dinamičkim pobudama.

Zahvala. Autori se zahvaljuju laborantu Dominiku Štroku, *bacc. ing. aedif. iz Laboratorija za konstrukcije Građevinskog fakulteta u Rijeci za pomoć prilikom pripreme i provedbe, čiji su rezultati prikazani u ovom radu. Istraživanje je provedeno kao dio projekta „Dinamička karakterizacija krutih blokova s kohezivnim kontaktima“ uniri-iskusni-tehnic-23-280 te projekta „Efikasno i robusno računalno modeliranje raslojavanja prostornih slojevitih konstrukcija“ uniri-iskusni-tehnic-23-300.*

Literatura

- [1] Tomažević, M. (2000) Protupotresna obnova postojećih zidanih građevina. *Građevinar*, 52(11), 683-693.
- [2] Ozmen, C. Er Akan, A., Unay A. I. (2011) Proračun povijesne zidane zgrade. *Građevinar*, 63(05), 449-458.
- [3] Housner, G. W. (1963) The Behavior of Inverted Pendulum Structures During Earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53(2), 403-417.

- [4] Andreaus, U. & Casini, P. (1999) Dynamics of Three-Block Assemblies with Unilateral Deformable Contacts. Part 2: Actual Application. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 28(12), 1637–1649.
- [5] Dhanasekar, M., Kleeman, P. W. & Page, A. W. (1985) Biaxial Stress–Strain Relations for Brick Masonry. *Journal of Structural Engineering*, 111(5), 1085–1100.
- [6] Lourenço, P. B. (2002) Computations on Historic Masonry Structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 4(3), 301–319.
- [7] Demirlioglu, K., Gonen, S., Soyoz, S. & Limongelli, M. P. (2020) In-Plane Seismic Response Analyses of a Historical Brick Masonry Building Using Equivalent Frame and 3D FEM Modeling Approaches. *International Journal of Architectural Heritage*, 14(2), 238–256.
- [8] Cundall, P. A. & Hart, R. D. (1992) Numerical Modelling of Discontinua. *Engineering Computations*, 9(2), 101–113.
- [9] Smoljanović, H., Živaljić, N. & Nikolić, Ž. (2013) Overview of the Methods for the Modelling of Historical Masonry Structures. *Građevinar*, 65(7), 689–703.
- [10] Forgács, T., Sarhosis, V. & Bagi, K. (2017) Minimum Thickness of Semi-Circular Skewed Masonry Arches. *Engineering Structures*, 140, 317–336.
- [11] Sarhosis, V., Lemos, J. V. & Bagi, K. (2019) Chapter 13 – Discrete Element Modeling. In: *Numerical Modeling of Masonry and Historical Structures: From Theory to Application*. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, pp. 469–501.
- [12] Munjiza, A. (2004) *The Combined Finite–Discrete Element Method*. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester.
- [13] Smoljanović, H., Živaljić, N., Nikolić, Ž. & Munjiza, A. (2021) Numerical Simulation of the Ancient Protiron Structure Model Exposed to Seismic Loading. *International Journal of Architectural Heritage*, 15(5), 779–789.
- [14] Nikolić, Ž., Krstevska, L., Marović, P. & Smoljanović, H. (2019) Experimental Investigation of Seismic Behaviour of the Ancient Protiron Monument Model. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 48(10), 1064–1081.
- [15] Castellano, A., Elia, I., Fraddosio, A., Olivieri, C. & Piccioni, M. D. (2021) A New Experimental Approach for Small-Scale Dynamic Tests on Masonry Arches Aimed at Seismic Assessment. *International Journal of Masonry Research and Innovation*, 7(1–2), 1–21.
- [16] Čaušević, M. (2000) *Tehnička mehanika-Kinematika*. Školska knjiga, Zagreb, prvo izdanje.
- [17] Čeh, N. (2022) *Materijali iz kolegija Mehanika II*. Sveučilište u Rijeci. Građevinski fakultet.
- [18] Škec, L. (2022) *Materijali iz kolegija Otpornost materijala I*. Sveučilište u Rijeci. Građevinski fakultet.
- [19] Janković, A. (2024). *Numerička i eksperimentalna analiza dinamičkog odgovora blokovskog portala s elastičnim kontaktima (Završni rad)*. Rijeka:

- Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet. Preuzeto s <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:157:229105>
- [20] Grbčić, S. (2022) Materijali iz kolegija Otpornost materijala II. Sveučilište u Rijeci. Građevinski fakultet.
- [21] Wilson, E. L. (2002) Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures, A Physical Approach With Emphasis on Earthquake Engineering. Computers and Structures, Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA, third edition.
- [22] Chopra, A. K. (2020) Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering. Pearson Education Limited, Harlow, United Kingdom, fifth edition.
- [23] Građevinski fakultet u Rijeci, Katalog laboratorijske opreme, https://www.gradri.uniri.hr/files/Katalog_laboratorijske_i_terenske_opreme_GF_Rijeka.pdf, (2017).