

Primljen / Received: 14.2.2022.

Ispravljen / Corrected: 27.8.2022.

Prihvaćen / Accepted: 18.10.2022.

Dostupno online / Available online: 10.12.2022.

Analiza granične nosivosti zidanih svodnih mostova

Autori:



¹Kefan Chen, dipl.ing. građ.
kfchen@chd.edu.cn



^{1,2}Izv.prof.dr.sc. Yuan Li
2018121131@chd.edu.cn
Autor za korespondenciju



¹Qixiang Hui, dipl.ing. građ.
2020221027@chd.edu.cn



³Mr.sc. Bin Zhou
821499331@qq.com



¹Mr.sc. Kang Wang
2020221005@chd.edu.cn

¹ Sveučilište Chang'an, Xi'an, Kina
Prometni fakultet

^{1,2} Sveučilište Chang'an, Xi'an, Kina
Glavni laboratorij za tehnologiju otkrivanja i ojačanja starih mostova Ministarstva prometa

³ Ningxia Communications Construction Co., Kina

Prethodno priopćenje

Kefan Chen, Yuan Li, Qixiang Hui, Bin Zhou, Kang Wang

Analiza granične nosivosti zidanih svodnih mostova

U svrhu točne procjene granične nosivosti zidanih lučnih konstrukcija, uzimajući u obzir odnos trenja i prionjivosti između različitih komponenti, u ovom je radu definiran numerički model metodom konačnih elemenata s kohezivnim elementima nulte debljine. Model je analiziran eksplicitnim dinamičkim simulacijama i potvrđen na stvarnom mostu. Rezultati pokazuju da je nosivost konstrukcije u pozitivnom kvadratnom omjeru s debljinom lučne ispune i prstena, a omjer visine i raspona mosta (strelica luka) imaju kubični omjer. Naime, postoji optimalna vrijednost strelice luka ($f/l = 1/3,909$), kod koje konstrukcija ima maksimalnu nosivost pod istim uvjetima.

Ključne riječi:

zidane lučne konstrukcije, granična nosivost, metoda konačnih elemenata, kohezivni konačni element, eksplicitna dinamička analiza

Research Paper

Kefan Chen, Yuan Li, Qixiang Hui, Bin Zhou, Kang Wang

The Ultimate Bearing Capacity analysis of masonry arch bridges

To accurately evaluate the ultimate bearing capacity of masonry arch structures, considering the friction and bonding relationships between different components, a finite element model was established in this study with cohesive zero-thickness elements. The model was analysed using explicit dynamic simulations and verified through a case study. The results indicate that the thickness of the arch backfill and ring has a quadratic positive correlation with the ultimate bearing capacity of the structure, whereas the rise-span ratio has a cubic relationship. In particular, there is an optimal rise-span ratio ($f/l = 1/3.909$) to increase the bearing capacity of the structure under the same conditions.

Key words:

masonry arch structures, ultimate bearing capacity, finite element method, cohesive finite element, explicit dynamic analysis

1. Uvod

Iako su zidane svođene konstrukcije primjenjivane od davnina, procjena nosivosti takvih konstrukcija ni danas nije lak i jasan zadatak [1-3]. Ovi mostovi danas se nalaze uglavnom na cestama u ruralnim područjima, te kao zaštićeni spomenici kulturne baštine. Detaljna analiza i procjena njihove nosivosti važna je za obnovu, ojačanje i očuvanje.

U davnini se većina zidanih svođenih konstrukcija sastojala od blokova različitih oblika i veličina povezanih mortom [4, 5]. Te su građevine uglavnom izgrađene od lokalnih materijala s nepoznatim svojstvima. Stoga je mehanizam konstrukcija, posebno u pogledu dinamičkog ponašanja, mnogo teže precizno simulirati u usporedbi s prednapetim lučnim mostovima [6]. Dinamičko ponašanje zidanih svođenih konstrukcija temeljito je među prvima istražio Jacques Heyman. S razvojem modernih računinskih i numeričkih metoda, numerički modeli definiraju se na različite načine, kao što su metoda konačnih elemenata, metoda diskretnih elemenata, kombinirana metoda diskretnih elemenata i metoda opruge krutog tijela (eng. *rigid body spring method*), kako bi se istražila linearna i nelinearna svojstva konstrukcija [7-13]. Fang je proveo tri metode evaluacije u AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials - Američka udruga službenika državnih cesta i prometa) i predložio točniji pristup vrednovanju temeljen na metodi ocjenjivanja faktoraf opterećenja i otpora [14]. Orduna je proveo detaljnu analizu 3D modela kako bi istražio mehanizam sloma konstrukcije, primjenjujući različite principe kontaktne interakcije [15, 16].

Općenito se smatra da je nosivost zidanih svođenih mostova uglavnom definirana geometrijom svoda, dimenzijama kamenih blokova i veze s materijalom za ispunu ili okolnim zidovima [17-21]. S obzirom na to da današnji mostovi imaju mnogo veću trajnost, njihova granična nosivost, kada se uzme u obzir doprinos i ispune, bočnih zidova i upornjaka, daleko je iznad očekivane vrijednosti izračunane tradicionalnim metodama. U slučaju kada je granična nosivost mosta pogrešno određena, troškovi njegova ojačanja i ponovne izgradnje bit će vrlo veliki i nepotrebni. Stoga, s obzirom za potrebom za ocjenjivanje postojećih svođenih mostova na cestama u ruralnim dijelovima, razvoj metode za analize nosivosti ovih mostova treba posebno kvantificirati.

Na temelju eksperimentalnih podataka iz projekta rekonstrukcije svođenih mostova u ruralnim dijelovima, uzimajući u obzir doprinos nosivih elemenata i trenja ukupnoj nosivosti, definiran je numerički model s kohezivnim konačnim elementima i analiziran eksplicitnom dinamičkom simulacijom. Točnost modela dodatno je verificirana pomoću analize stvarnog mosta navedenog u literaturi. Na temelju toga, čimbenici utjecaja kao što su omjer visine i raspona, debljina svoda i debljina ispune detaljno su analizirani kao ulazni podaci za daljnje istraživanje i procjenu nosivosti svođenih mostova.

2. Numeričke metode

U pravilu, odnos naprezanja i deformacije (konstitutivni odnos) kod materijala utječe na makroskopsko ponašanje kod sloma [22]. U ovom je radu za točnu simulaciju sloma kohezivnog elementa primijenjen bilinearan odnos naprezanja i deformacije [23], kao što je prikazano na slici 1. (radni dijagram).

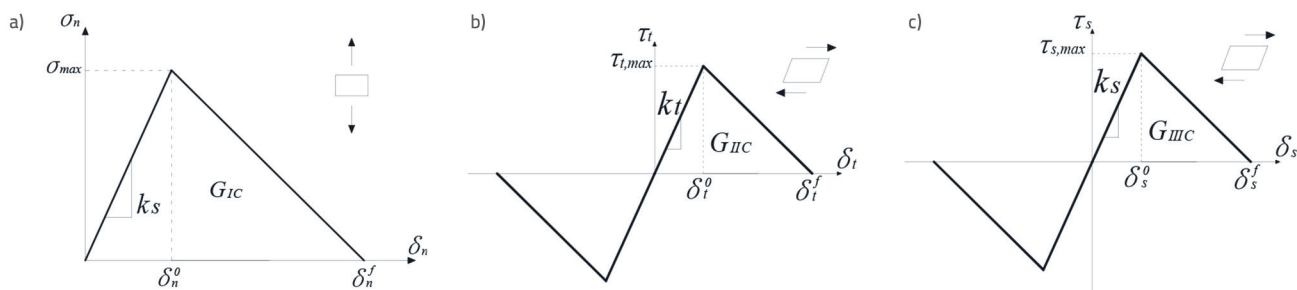
Na slici 1., simboli "n", "t" i "s" predstavljaju naprezanja u normalnom, tangencijalnom i posmičnom smjeru. Izlomljeni oblik radnog dijagrama odgovara obliku sloma (način I), kliznom slomu (način II), odnosno slomu izvan ravnine zbog posmika (način III). Nagibi radnih dijagrama na slici 1. k_n i k_λ ($\lambda = t, s$) također predstavljaju elastičnu krutost u tri smjera, kao što je prikazano u izrazu (1); σ_n te τ_λ , τ_n su vlačna naprezanja u ova tri smjera; σ_{max} , $\tau_{\lambda,max}$, τ_{max} najveća vrijednost σ_n i τ_λ , T_n odnosno; δ_n^0 i δ_λ^0 su odgovarajuće vrijednosti pomaka σ_n i τ_λ , a δ_n^f i δ_λ^f granični pomaci nakon otvaranja pukotina u ta tri smjera. Iz slike 1 mogu se izvesti sljedeće jednadžbe za odnose naprezanje – deformacija:

$$k_n = \frac{\sigma_{max}}{\delta_n^0} \tag{1a}$$

$$k_\lambda = \frac{\tau_{\lambda,max}}{\tau_\lambda^0} \tag{1b}$$

$$\sigma_n = \begin{cases} k_n \delta & (\delta \leq \delta_n^0) \\ \sigma_{max} \frac{\delta^f - \delta}{\delta_n^f - \delta_n^0} & (\delta > \delta_n^0) \end{cases} \tag{1c}$$

$$\tau_\lambda = \begin{cases} \text{sgn}(\Delta u) k_\lambda \delta & (\delta \leq \delta_\lambda^0) \\ \text{gn}(\Delta u) \tau_{\lambda,max} \frac{\delta_\lambda^f - \delta}{\delta_\lambda^f - \delta_\lambda^0} & (\delta > \delta_\lambda^0) \end{cases} \tag{1d}$$



Slika 1. Bilinearna konstitutivna relacija: a) u normalnom smjeru; b) u tangencijalnom smjeru; c) u posmičnom smjeru

Tablica 1. Uputa kontaktnih odnosa

Vrsta spoja	Opis
Privezivanje	Primjenjuje se za spajanje dviju površina, te prenosi vlačno i tlačno naprezanje. Spojna površina nema relativnog pomaka ili deformacije, a krutost je relativno velika.
Spajanje	Kruta veza između referentne točke i površine elementa, pomak vezanog elementa prati pomak referentne točke..
Kohezivna veza	Simulacija spojnog sredstva (npr. morta) kao veza između dva elementa koja ima svoje karakteristike. Uvjet je da je veličina i čvrstoća veznog sredstva manja od čvrstoće elemenata koji se povezuju.
Trenje	Primjenjuje se pri simulaciji tangencijalne interakcije između materijala ispune i nasipa te ostalih komponenti mosta. Smjer tangente kontrolira se trenjem, a normalni smjer simulira se tlačnom vezom koja dopušta odvajanje, ali sprječava prodiranje jednog elementa u drugi.

Iz ovih izraza dobije se energija sloma za tri različita oblika sloma:

$$G_{IC} = \frac{1}{2} \sigma_{\max} \delta_n^f \tag{2a}$$

$$G_{IIC} = \frac{1}{2} \tau_{t,\max} \delta_t^f \tag{2b}$$

$$G_{IIIC} = \frac{1}{2} \tau_{s,\max} \delta_s^f \tag{2b}$$

Za definiciju sloma konstrukcije primjenjuje se kriterij drugog nominalnog naprezanja kako bi se odredio početak oštećenja kada krutost materijala počne opadati, kao što je prikazano u izrazima (3):

$$D = \left\{ \frac{\langle \sigma_n \rangle}{\sigma_{\max}} \right\}^2 + \left\{ \frac{\tau_t}{\tau_{t,\max}} \right\}^2 + \left\{ \frac{\tau_s}{\tau_{s,\max}} \right\}^2 \tag{3a}$$

$$\langle \sigma_n \rangle = \begin{cases} 0 & \sigma_n \leq 0 \\ \sigma_n & \sigma_n > 0 \end{cases} \tag{3b}$$

U izrazu (3b) materijali se ne oštećuju uslijed tlačnog naprezanja, što je u skladu s karakteristikama oštećenja svodjenog kamenog mosta. Nakon inicijacije oštećenja, uveden je parametar e za kriterij loma G_{TC} s početnom vrijednošću od 0. Vrijednost parametra je takva da je materijal neoštećen pri $G_{TC} = 0$, dok potpuni slom materijala nastaje pri vrijednosti $G_{TC} = 1$. Nadalje, primijenjen je standard energije loma za određivanje načina sloma konstrukcije. Točnije, primjenjuje se Benzeggagh-Kenaneov zakon (BKL), prikazan u izrazu (4):

$$G_{TC} = G_{IC} + (G_{IIIC} - G_{IIC}) \cdot \left(\frac{G_{II} + G_{III}}{G_I + G_{II} + G_{III}} \right)^\eta \tag{4}$$

pri čemu su G_i ($i = I, II, III$) energija loma u vlaku; a η je konstanta koja određuje brzinu odziva materijala prilikom pojave pukotina i sloma.

Inicijalna deformacija raste linearno s porastom vlačnog naprezanja. Kada ono dosegne vršnu vrijednost, naprezanje

linearno pada na nulu dok deformacija i dalje raste. Analizom parametra G_{TC} može se prosuditi hoće li doći do potpunog sloma materijala.

U ovom je radu međudjelovanje između različitih komponenata mosta simulirano pomoću nelinearnog trenja definiranog kao vezni element [25, 26]. Četiri različite metode međudjelovanja primijenjene su u numeričkom modelu i prikazane u tablici 1.

Bitno je napomenuti da je viskozna interakcija morta simulirana pomoću kohezivnih konačnih elemenata i kohezivnog tipa veze, što dovodi do sljedećih prednosti:

- jedinstveni odnos naprezanja i deformacija usvojen je od strane kohezivnog konačnog elementa kako bi se simulirao nastanak i propagacija pukotina, čime se smanjuje vjerojatnost pojave vršnog naprezanja na početku pukotine
- kohezivni model može simulirati situaciju u kojoj početak pukotine ulazi u plastično područje, što pruža priliku za proučavanje plastičnog zgloba na početku pukotine
- kohezivni model ne zahtijeva unaprijed definirane pukotine u konstrukciji
- kohezivni model može točno simulirati inicijaciju te propagaciju oštećenja konstrukcije.

3. Eksplicitna dinamička analiza i potvrda na stvarnom mostu

3.1. Parametri stvarnog mosta

Sastavljanjem trodimenzionalnih deformabilnih elemenata konstrukcije, određenih C3D8R linearnim heksaedarskim 8-čvornim elementom sa 6 stupnjeva slobode za svaki čvor, definira se konačni numerički model konstrukcije. Mort je simuliran veznom jedinicom, a ona je definirana kohezivnim elementima. Kako bi se osigurala točnost modela kohezije, eksplicitna dinamička analiza primijenjena je pozivanjem na detaljne parametre iz ispitivanja opterećenja zidanog lučnog mosta [26]. Komponente zida, ispune, bočnog zida i upornjaka modela svodjenog zidanog mosta simulirane su elementima pomoću komercijalnog softvera ABAQUS [27]. Usvojeni parametri prikazani su u tablicama 2. i 3. [20, 26].

Tablica 2. Geometrijski parametri – Most Cemetery [26]

Raspon [m]	Visina [m]	RSR	TAR [cm]	Širina prstena glavnog luka [m]	TAS [cm]
7,16	3,05	1/2,35	45	7,62	30

Tablica 3. Osnovna svojstva materijala – Most Cemetery [26]

Komponenta	Modul elastičnosti [MPa]	Poissonov omjer	Gustoća [kg/m ³]
Zid	2400	0,2	2400
Ispuna	500	0,3	1750
Upornjak	1500	0,2	2400

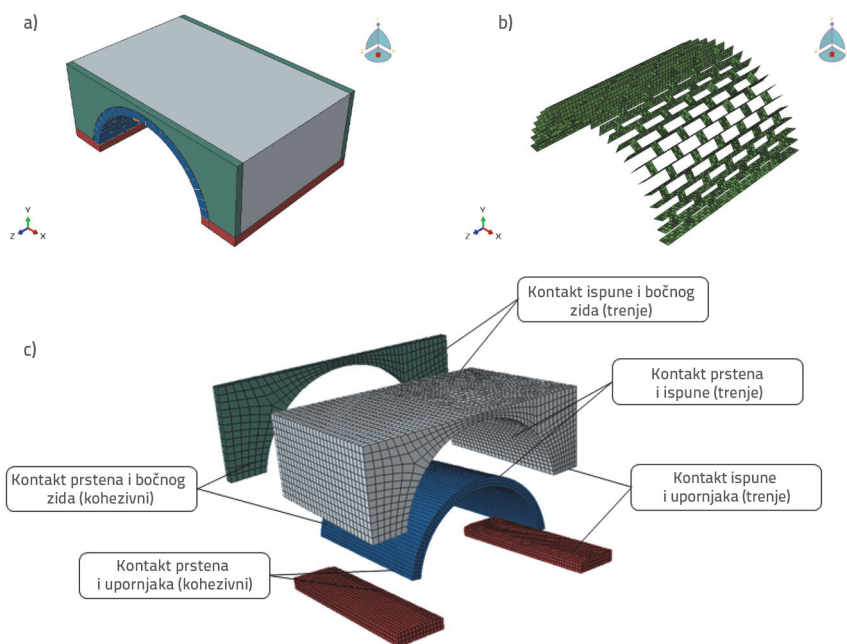
Tablica 4. Sučelje i granični uvjeti modela

Vrsta spoja	Mjesto spoja	
Privezivanje	Svod	Bočni zid
	Upornjak	Bočni zid
Spajanje	Prva referentna točka (opterećenje)	Površina opterećenja
Kohezivna veza	Svod	Bočni zid
	Svod	Upornjak
	Praznine između blokova	
Trenje	Svod	Ispuna
	Ispuna	Bočni zid
	Ispuna	Upornjak

Dno upornjaka u potpunosti je konsolidirano i modelira se kao čvrsto tlo. Ostali odnosi između elemenata prikazani su u tablici 4., a shematski prikaz dan je na slici 2.

Usvojeni parametri materijala prikazani su u tablici 5.

U tablici 5., E_0 je Youngov modul elastičnosti zida; f_t i f_s su koeficijenti trenja u dva tangencijalna smjera. Kao što je spomenuto, nelinearni elementi trenja/vezivanja primijenjeni su u ovom radu kako bi se simulirala interakcija uglavnom između ispunje i drugih elemenata u dva tangencijalna smjera. Na temelju toga, interakcija trenja primijenjena je na kohezivne elemente u tangencijalnom i posmičnom smjeru. Interakcija u normalnom smjeru primijenjena je tlačnim spojem, koji omogućuje odvajanje, ali ne i prodor dva vezana elementa. Uz to, krutost u normalnom smjeru k_n modelira se kao velika.

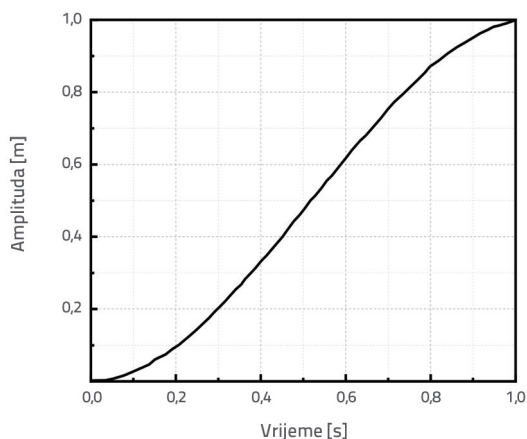


Slika 2. Model konačnih elemenata s istaknutim vezama: a) Izrađeni model konačnih elemenata; b) Vezani elementi; c) Prikaz veza između elemenata numeričkog modela

Tablica 5. Karakteristike materijala za numerički model

$\sigma_{n',max}$ [MPa]	$\tau_{t,max}$ [MPa]	$\tau_{s,max}$ [MPa]	G_1 [N/mm]	G_{II} [N/mm]	G_{III} [N/mm]
0,051	0,063	0,063	0,02	0,125	0,125
k_n [MPa/mm]	k_t [MPa/mm]	k_s [MPa/mm]	η	f_t	f_s
$E_0 \times 10^4$	3,98	3,98	2,2	0,3	0,3

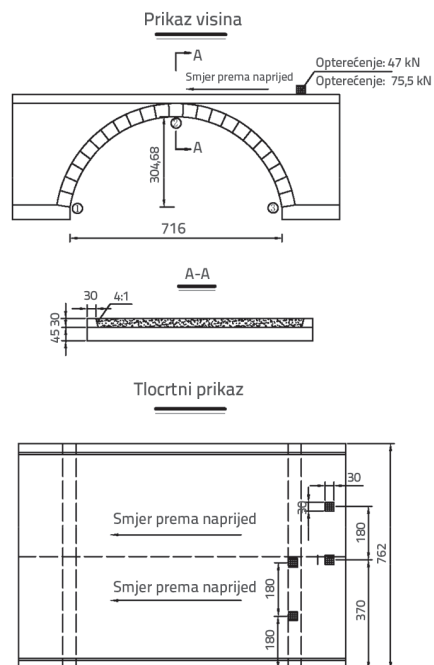
Kako bi se osigurao stabilan proces kvazistatičkog opterećenja modela, glatka krivulja, uglavnom u prvoj i drugoj derivaciji, amplitude primijenjena je s periodom opterećenja od 1 sekunde, što je otprilike deset puta više od prvog vlastitog perioda vibracije, krivulja je prikazana na slici 3.



Slika 3. Glatka krivulja amplitude tijekom 1,0 sekunde

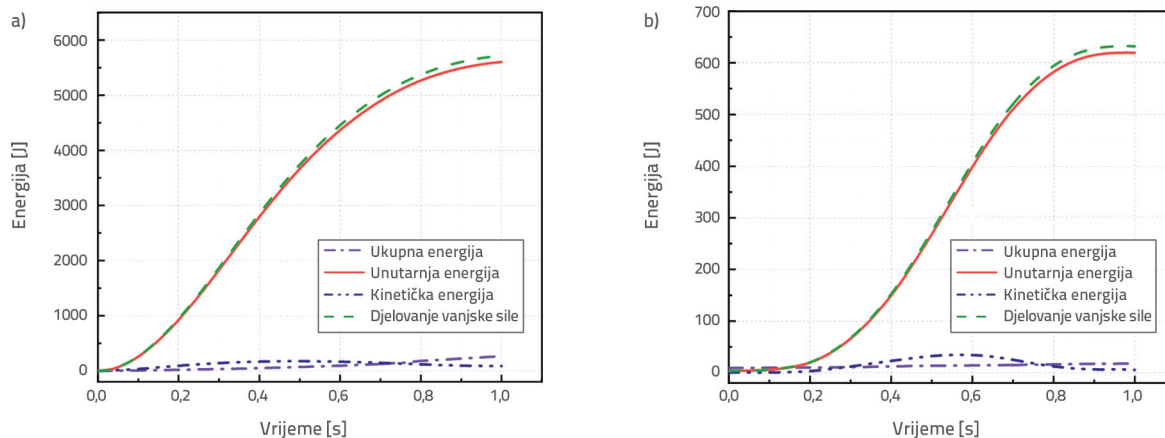
3.2. Eksplicitna dinamička analiza

Prometno opterećenje na mostu "Cemetery" simulirano je kamionima pod punim opterećenjem (75,5 kN) na lijevom i desnom rubu ceste, a u sredini ceste postavljeni su kamioni pod polovicom opterećenja (47 kN). Shema prometnog opterećenja prikazana je na slici 4. Vidljivo je da su uzdužne

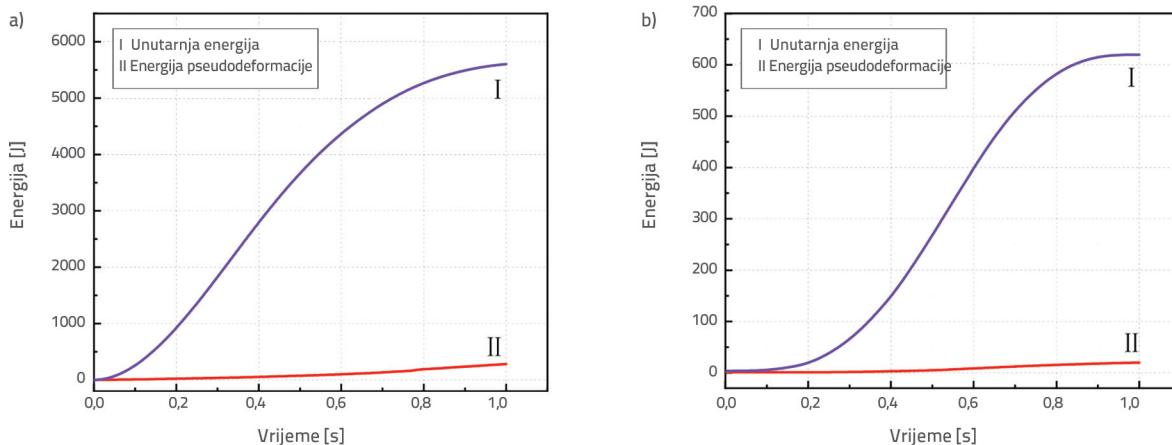


Slika 4. Prometno opterećenje mosta "Cemetery"

osi vozila ekvivalentne dvama blokovima opterećenja na istom poprečnom presjeku danom na slici 4. Usporedbom energije i vremena opterećenja vozilom s koncentriranim opterećenjem na svodu, potvrđeno je da je provedena dinamička simulacija kvazistatična. Na slici 5. prikazana je time-history analiza za oba slučaja opterećenja.



Slika 5. Analiza energije i vremena: a) Tijekom opterećenja vozilom; b) Tijekom koncentriranog opterećenja na svodu



Slika 6. Analiza energije i vremena opterećenja s dva vozila: a) Tijekom opterećenja vozilom; b) Prilikom koncentriranog opterećenja na svodu

Na slici 5. kinetička energija pri opterećenju vozilom ne prelazi 3,2 % unutarnje energije, a kinetička energija u simulaciji sloma centraliziranog opterećenja svoda ne prelazi 5,4 % unutarnje energije. Nadalje, krivulja kinetičke energije slična je krivulji unutarnje energije unutar pogreške od 6 %, što dokazuje da provedena analiza ostaje u kvazistatičkom području. Kako bi se izbjegao problem deformacije u obliku pješčanog sata, energija pseudodeformacije trebala bi se ograničiti na ispod 10 % unutarnje energije. Krivulje energije pseudodeformacije i krivulja unutarnje energije u dva slučaja opterećenja prikazane su na slici 6.

Na slici 6., energija pseudodeformacije u modelu opterećenja vozilom čini oko 4,9 % unutarnje energije, a energija pseudodeformacije u modelu koncentriranog opterećenja svoda čini oko 3,2 % unutarnje energije. To upućuje na pouzdanost i učinkovitost odabrane metode konačnih elemenata.

3.3. Potvrda metode kroz cijeli proces stanja opterećenja

Za daljnju potvrdu učinkovitosti dinamičke simulacije kohezivnog modela, rezultati dobiveni simulacijom u ovom radu (naznačeni kao PRE u tablicama 6. i 7.) uspoređeni su s rezultatima iz [27] (naznačeni kao REF u tablicama 6. i 7.), i prikazani u tablici 6.

Kao što je prikazano u tablici 6., podaci iz simulacije prikazane u ovom radu u osnovi odgovaraju podacima iz testa opterećenja referentnog modela. Štoviše, kako bi se napravila jasna usporedba, odabrana su još dva rezultata dobivena MKE (metoda konačnih elemenata) modelom mosta "Cemetery" [17]. Prvi je definiran samo s modelom svoda bez ispune (naznačen kao BAF u tablici 7.). Drugi je definiran s ekvivalentnom ispunom i bez razmatranja kontaktnog odnosa različitih elemenata (naznačen kao NCF u tablici 7.).

Tablica 6. Usporedba proračunskog pomaka u različitim uvjetima

Slučaj opterećenja	Maksimalni pomak [μm]					
	①*		②		③	
	REF	PRE	REF	PRE	REF	PRE
Pola opterećenja lijevo do pola raspona	-48	-45	396	384	-8	-8
Pola opterećenja lijevo preko cijelog raspona	-66	-61	437	430	-30	-30
Pola opterećenja desno do pola raspona	-28	-28	145	141	-15	-14
Pola opterećenja desno preko cijelog raspona	-36	-34	147	145	-3	-2
Puno opterećenje lijevo do pola raspona	-58	-57	630	616	-64	-59
Puno opterećenje lijevo preko cijelog raspona	-76	-78	622	627	-56	-55
Puno opterećenje desno do pola raspona	-51	-47	254	245	-20	-21
Puno opterećenje desno preko cijelog raspona	-46	-44	224	222	-23	-20

Napomena: * oznaka položaja za mjerenje pomaka označena na uzdužnom presjeku na slici 4.

Tablica 7. Vrijednost krajnjeg opterećenja dobivena pomoću četiri metode

Rezultati	BAF	NCF	PRE	REF
UBC [kN]	251	599	817	875

Tablica 8. Osnovna svojstva materijala korištena za numerički model

Komponenta	Youngov modul elastičnosti [MPa]	Poissonov omjer	Gustoća [kg/m ³]
Zid	5650	0,2	2500
Ispuna	500	0,3	1750
Upornjak	1500	0,2	2400

Konačna vrijednost opterećenja na tjemenu svoda prikazana je u tablici 7.

Ako su rezultati dobiveni terenskim ispitivanjem (REF) odabrani kao referentna vrijednost, simulirana pogreška BAF, NCF i PRE je 71,3 %, 31,5 %, odnosno 6,6 %. U usporedbi s modelima svoda bez ispune (BAF) ili modelom bez razmatranja kontaktnog odnosa različitih elemenata (NCF), iz rezultata je vidljivo da kohezivni model predložen u ovom radu može izračunati graničnu nosivost zidanog svodenog mosta s velikom točnošću.

4. Rasprava o utjecaju različitih faktora na graničnu nosivost

U skladu s metodom izrade numeričkog modela korištenu za most "Cemetery", uspostavljen je model konačnih elemenata

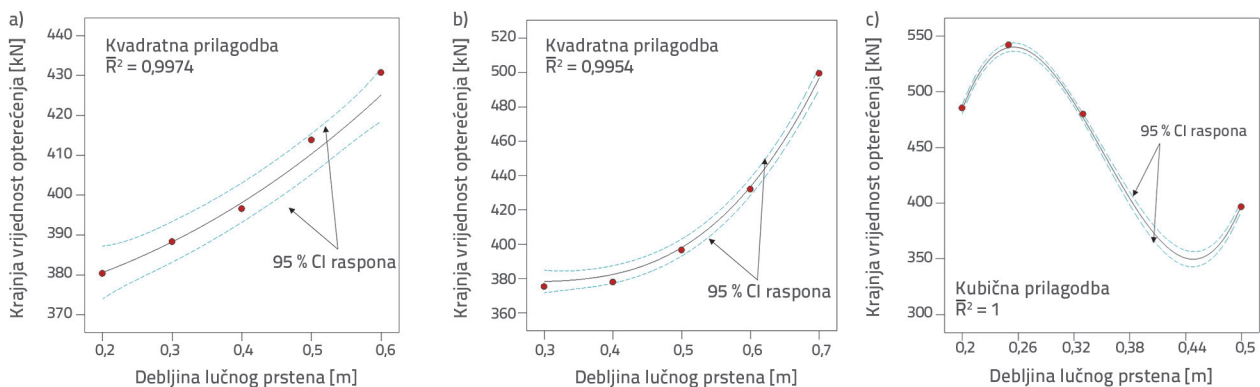
svodenog zidanog mosta za proučavanje utjecaja različitih faktora učinka na graničnu nosivost, kao što su debljina ispune, debljina svoda i omjer visine i raspona. Kroz pregled 95 zidanih svodenih mostova u projektu obnove ruralnih cesta u provinciji Guangdong u sjeveroistočnoj Kini, definirana su osnovna svojstva materijala konačnog modela, prikazana u tablici 8., [28]. Prema preliminarnom izračunu, prvi period titranja modela je između 0,0625 s i 0,0900 s. Na temelju toga, u sljedećim ispitivanjima još uvijek je period opterećenja od 1,0 s.

4.1. Parametarska analiza različitih čimbenika utjecaja

Za proučavanje trenda promjene utjecaja usvojena je metoda postupe promjene varijabli za ova tri čimbenika utjecaja s

Tablica 9. Vrijednost krajnjeg opterećenja konačnog modela pod različitim uvjetima (jedinica: kN)

TAR [m]	RSR	TAS [m]				
		0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
0,3	0,2	461,912	464,104	466,584	470,76	475,408
	0,25	488,992	506,92	524,072	529,024	534,84
	0,33	454,984	459,632	463,968	466,872	470,424
	0,5	359,256	367,312	375,240	393,168	409,784
0,4	0,2	462,612	465,392	467,916	473,080	477,832
	0,25	492,972	509,000	524,98	530,864	536,34
	0,33	455,984	461,400	465,484	468,128	472,932
	0,5	361,788	369,824	377,888	394,600	412,244
0,5	0,2	479,312	482,056	485,248	490,656	496,256
	0,25	512,952	527,632	541,888	547,448	553,840
	0,33	469,784	475,152	479,800	485,888	491,440
	0,5	380,32	388,280	396,536	413,8	430,704
0,6	0,2	502,668	507,000	510,656	515,720	520,808
	0,25	547,864	562,696	577,568	583,768	589,608
	0,33	494,92	500,116	505,216	510,808	516,484
	0,5	416,488	424,608	431,924	444,680	457,512
0,7	0,2	558,024	562,824	568,064	572,280	577,360
	0,25	614,776	629,72	645,248	651,536	657,376
	0,33	552,416	557,464	562,464	567,648	573,528
	0,5	484,656	491,928	499,312	507,560	516,320

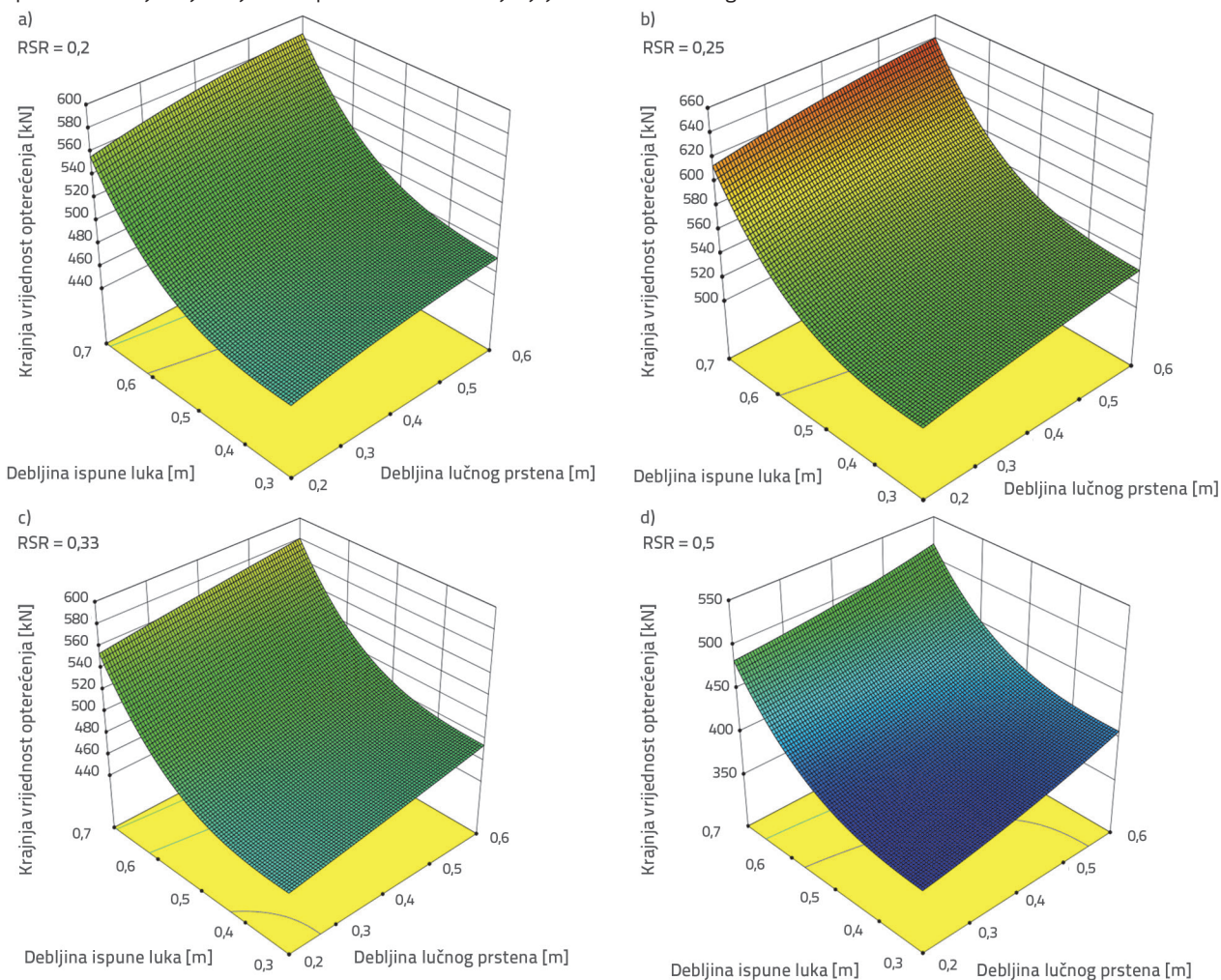


Slika 7. Trendovi varijacija graničnog opterećenja u različitim uvjetima: a) Utjecaj debljine ispune svoda; b) Utjecaj debljine svoda; c) Utjecaj omjera visine i raspona (strelica svoda)

vrijednošću intervala od 0,1. Uz postupno povećanje, linearno opterećenje primjenjuje se u smjeru širine mosta na tjemenu svoda sve dok model ne pokaže da je došlo do potpunog sloma konstrukcije u skladu s metodom opisanom u poglavlju 2. Rezultati su prikazani u tablici 9. Kako bi se relevantni odnosi među parametrima jasnije vidjeli, dva parametra se ne mijenjaju,

dok se treći mijenja s intervalom od 0,1. Štoviše, primjenjuje se polinomska funkcija prilagođavanja (eng. *Polynomial Fitting Function*) za jasnije otkrivanje relevantnih odnosa kao što je prikazano na slici 7.

Na slici 7. prikazano je da ova tri parametra imaju značajan učinak na graničnu nosivost svođenih zidanih mostova. Na



Slika 8. Odzivna površina tri faktora krajnje vrijednosti opterećenja, debljine ispune luka i debljine lučnog prstena

Tablica 10. Uputa o različitim principima kalibracije modela

Oznaka	Opis
W1	Savršen model tijekom opterećenja na tjemenu svoda
W2	Oštećeni model na 1/4 raspona tijekom opterećenja na tjemenu svoda
W3	Defektni model na sredini raspona tijekom opterećenja na tjemenu svoda
W4	Savršen model sa svodom bez ispune

slikama 7.a do 8.d, krivulja prilagodbe debljine ispune i svoda u odnosu na graničnu nosivost ima izgled kvadratne funkcije. Prosječni koeficijenti korelacije dosegli su 0,9974 i 0,9954 u svakom modelu prilagodbe, što dodatno potvrđuje definiranu metodu. Također, dokazano je da odnos između omjera visine i raspona i granične nosivosti ima oblik standardne kubične funkcije pomoću 25 eksperimentalnih podataka, dok je prosječni koeficijent korelacije dosegao 1. Pod kubnom relacijom ilustrirano je da postoji optimalan omjer, s prosječnom vrijednošću ekstremne točke od $x = 0,2558$ i standardnom devijacijom od $\sigma = 5,75 \times 10^{-4}$. Nakon što je uvjet zadovoljen, vrijednost graničnog opterećenja konstrukcije doseže svoj maksimum. Za daljnju raspravu o trendu utjecaja debljine lučnih ispuna i prstena, analiza odzivne površine ova dva faktora utjecaja prikazana je na slici 8.

Na slici 8., rezultati analize odzivne površine pokazuju da savršeni modeli predviđanja debljine ispune i svoda monotono rastu pod različitim omjerima visine i raspona. Slike prikazuju da će ispuna i svod rezultirati ravnomjernim opterećenjem mosta. Osim toga, ispuna obuzdava svod kako bi došlo do učinka zatezanja, a time se također izbjegava koncentracija naprezanja. Dakle, granična vrijednost opterećenja raste s povećanjem debljine tih dvaju faktora.

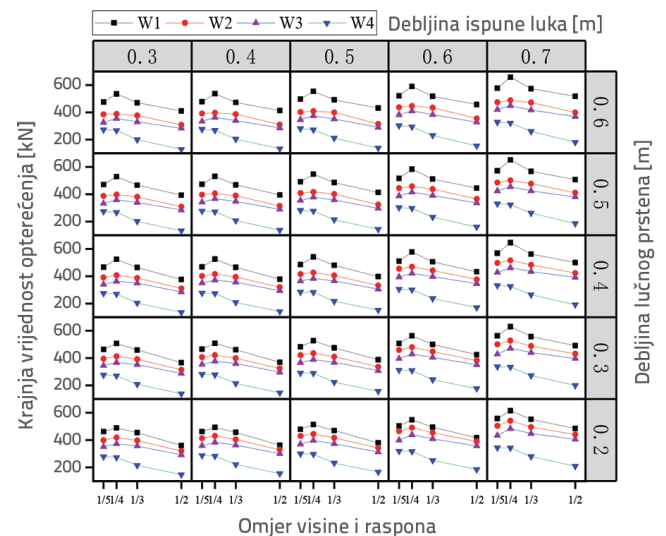
4.2. Analiza utjecaja oštećenja i nepravilnosti svoda

Zidani svodeni mostovi, posebno oni koji se nalaze u ruralnim sredinama i izgrađeni su davno, nisu savršeni. Svi su služili i služe svrsi, ali s različitim oštećenjima ili nedostacima. Za analizu utjecaja oštećenja i nepravilnosti svoda primjenjuje se princip uklanjanja oštećenih elemenata iz numeričkog modela mosta pod različitim uvjetima. Brisanje elementa podrazumijeva da se njegova masa, prigušenje i opterećenje izjednačavaju s nulom. Kako bi se jasno analizirao utjecaj na graničnu nosivost, u tablici 10. predložena su četiri principa provjere modela.

Svojstva materijala te ostali parametri za numerički model preuzeti su iz modela korištenog u prethodnom istraživanju ovog rada. Na slici 9. prikazani su odabrani rezultati proračuna za nekoliko presjeka mosta.

Na slici 9., trend varijacije bilo kojeg faktora W1 do W3 približno je isti kao rezultati istraživanja u poglavlju 4.2. Točnije, granična vrijednost opterećenja svakog oštećenog modela veća je od modela svoda bez ispune. Nadalje, oštećeni model na tjemenu

luka (polovica luka) ima veći utjecaj na konstrukciju te njenu graničnu vrijednost nosivosti nego model oštećen na četvrtinu raspona. Maksimalne, minimalne i prosječne pogreške od W3 do W1 su 33,7 %, 14,2 %, odnosno 25 %. Maksimalne, minimalne i prosječne pogreške od W2 do W1 su 27,5 %, 6,5 %, odnosno 16,2 %. Prikazano je da, zbog degradacije materijala, nedostataka pri izvođenju svoda, te i fizičkih i kemijskih oštećenja, oštećenje na tjemenu svoda (u polovici raspona) ima veći utjecaj na granično nosivo opterećenje konstrukcije nego na presjeku od četvrtine raspona. Iz analize literature vidljivo je da 65 % zidanih svodenih mostova ima nedostatke u tjemenu, a 35 % njih ima nedostatke u blizini presjeka na četvrtinu raspona.



Slika 9. Trendovi varijacija graničnog opterećenja u različitim uvjetima

5. Zaključak

U ovom radu definiran je numerički model svodenog zidanog mosta koristeći elemente nulte debljine, te uzimajući u obzir trenje i interakciju između različitih elemenata mosta. Valjanost i učinkovitost modela provjereni su usporedbom rezultata s prethodnim istraživanjem. Glavni zaključci dobiveni primjenom eksplicitne dinamičke analize navode se kako slijedi:

- Uzimajući u obzir doprinos ispune svoda i trenja površine između različitih elemenata, kohezivni konačni model predložen u ovom radu može dobro simulirati dinamičko ponašanje zidanog svodenog mosta. U usporedbi s tradicionalnom metodom simulacije koja je uzimala u obzir samo svod bez ispune ili ekvivalentnu ispunu, primjetna je velika "rezerva" nosivosti postojećih zidanih svodenih mostova.
- Čimbenici utjecaja kao što su omjer visine i raspona, debljina svoda i ispune imaju značajan utjecaj na graničnu nosivost ovakvih mostova. Polinomska funkcija prilagođavanja debljine svoda i ispuna pokazuju kvadratni odnos funkcije u odnosu na graničnu nosivost. Nadalje, polinomska funkcija prilagođavanja omjera visine i raspona opisana je kubičnom funkcijom. Također

- pokazuje da postoji optimalna vrijednost omjera od $f/l = 1/3,909$ s kojom konstrukcija mosta može podnijeti veće opterećenje.
- Pod istim stanjem oštećenja, granično opterećenje ovakvih mostova na položaju tjemena svoda općenito je 8,8 % veće od onog na presjeku na četvrtinu raspona. Uzimajući u obzir najdefektivniju poziciju lociranu na svodu kroz pregledno istraživanje 95 zidanih svodenih mostova, to nadalje pokazuje da većina sadašnjih svodenih mostova još uvijek može zadovoljiti postojeće operativne zahtjeve unatoč povećanju volumena prometa.

- Model predviđanja MAS-ovog UBC-a formiran razmatranjem čvrstoće različitih materijala i drugih parametara bit će u središtu pozornosti sljedećeg istraživanja.

Zahvale

Zahvaljujemo na financijskoj potpori Programa temeljnih istraživanja prirodnih znanosti Shaanxija (program br. 2020JQ-377) i Naknada za poslovanje temeljnih istraživanja središnjih sveučilišta Sveučilišta Chang'an (br. 310821161012).

LITERATURA

- [1] Huerta, S.: Galileo was wrong: The geometrical design of masonry arches, *Nexus Netw.*, 8 (2006) 2, pp. 25–26
- [2] Tóth, A.R., Orbán, Z., Bagi, K.: Discrete element analysis of a stone masonry arch, *Mech. Res. Commun.*, 36 (2009), pp. 469–480
- [3] Loureno, P.B., Krakowiak, K.J., Fernandes, F.M., et al: Failure analysis of Monastery of Jerónimos, Lisbon: How to learn from sophisticated numerical models, *Engineering Failure Analysis*, 14 (2007) 2, pp. 280–300
- [4] Chetouane, B., Dubois, F., Vinches, M., Bohatier, C.: NSCD discrete element method for modelling masonry structures, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 64 (2005), pp. 65–94
- [5] Rafiee, A., Vinches, M.: Mechanical behaviour of a stone masonry bridge assessed using an implicit discrete element method, *Engineering Structures*, 48 (2013) 3, pp. 739–749
- [6] Paul, A., Fanning, J., et al.: Three-dimensional modelling and full-scale testing of stone arch bridges – ScienceDirect, *Computers & Structures*, 79 (2001) 29, pp. 2645–2662
- [7] Caliò, I., Greco, A., D'Urso, D.: Structural models for the evaluation of eigen-properties in damaged spatial arches: a critical appraisal, *Arch. Appl. Mech.*, 86 (2016), pp. 1853
- [8] Cannizzaro, F., Greco, A., Caddemi, S., Caliò, I.: Closed form solutions of a multi-cracked circular arch under static loads, *Int. J. Solids. Struct.*, 121 (2017), pp. 191–200
- [9] Caliò, I., D'Urso, D., Greco, A.: The influence of damage on the eigen-properties of Timoshenko spatial arches, *Comput. Struct.*, 190 (2017), pp.13–24
- [10] Tóth, A.R., Orbán, Z., Bagi, K.: Discrete element analysis of a stone masonry arch, *Mech. Res. Commun.*, 36 (2009) 4, pp. 469–80
- [11] WeiXin, R., EHarik, I., George, E.: Blandford etc. Roebling suspension bridge. I:finite-elementmedoland free vibration response, H:ambient testing and live load response, *Journal of Bridge Engineering*, 9 (2004), 2, pp. 110–126
- [12] Belytschko, T, Liu, V.Y., Moran, B.: *Nonlinear Finite Element for Continua and structures*, Monograph., John Wiley&Sons Inc., 2000.
- [13] Cai, C., Shahawy, M.: *Understanding Capacity Rating of Bridges from Load Tests*, Practice Periodical on Structural Design and Construction, 8 (2003), 4, pp. 209–216
- [14] Fang, N., Ellingwood, B., Zureick, A.: *Bridge Rating Using System Reliability Assessment. II: Improvements to Bridge Rating Practices*, *Journal of Bridge Engineering*, 16 (2011) 6, pp. 863–871
- [15] Orduna, A., Lourenco, P.B.: Three-dimensional limit analysis of rigid blocks assemblages, Part I: torsion failure on frictional interfaces and limit analysis formulation, *Int. J. Solids. Struct.*, 42 (2005), pp. 5140–5160
- [16] Orduna, A., Lourenco, P.B.: Three-dimensional limit analysis of rigid blocks assemblages. Part II: load-path following solution procedure and validation, *Int. J. Solids. Struct.*, 42 (2005), pp. 5161–5180
- [17] Cannizzaro, F., Pantò, B., Caddemi, S., et al.: A Discrete Macro-Element Method (DMEM) for the nonlinear structural assessment of masonry arches, *Engineering Structures*, 168 (2018), pp. 243–256
- [18] Tran, V.H., Vincens, E.: 2D-DEM modelling of the formwork removal of a rubble stone masonry bridge, *Engineering Structures*, 75 (2014), pp. 448–456
- [19] Liang, F., Huang, M.: *Structural Analysis of Solid Web Arch Bridge Considering the Confining Pressure Effect of Filling*, *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 29 (2010) 3, pp. 333–335
- [20] Liang, L.: *Analysis and Evaluation of Submerged Bearing Capacity of Stone Arch Bridge*, Graduate thesis, Chongqing Jiaotong University, 2010.
- [21] Baohua, X.: *Evaluation of the bearing capacity of the in-service solid-web masonry arch bridge*, Graduate thesis, Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [22] Giulio, A.: *On the influence of the shape of the interface law on the application of cohesive-zone models*, *Composites Science and Technology*, 66 (2006), pp. 723–730
- [23] Mi, Y., Crisfield, M.A., Davies, G.A.O., et al.: *Progressive delamination composite using interface elements*, *Journal of composite materials*, 32 (1998), 14, pp.1246–1272
- [24] Tubaldi, E., Macorini, L., Izzuddin, B.A.: *Three-dimensional mesoscale modelling of multi-span masonry arch bridges subjected to scour*, *Eng Struct*, 165 (2018); pp. 486–500
- [25] Zhang, Y., Tubaldi, E., Macorini, L., Izzuddin, B.A.: *Mesoscale partitioned modelling of masonry bridges allowing for arch-backfill interaction*, *Constr. Build. Mater.*, 173 (2018), pp. 820–842
- [26] Boothby, T.E., Domalik, D.E., Dalal, V.A.: *Service load response of masonry arch bridges*, *Journal of structural Engineering*, 124 (1998) 1, pp. 17–23
- [27] Abaqus 6.14: *Online Documentation*, Software Monograph, 2014.
- [28] Chang'an University: *Research Report on Technical Renovation Project of Dangerous Bridges in Rural Highways in Guangdong Province*, 2021.