

Primljen / Received: 25.10.2022.

Ispravljen / Corrected: 21.4.2023.

Prihvaćen / Accepted: 9.12.2023.

Dostupno online / Available online: 10.2.2024.

Ponašanje AB stupova zaštićenih aluminijskom pjenom zatvorenih ćelija (CAF) različitih debljina u slučaju udara

Autori:



¹Jingdong Liu, dipl.ing.građ.
ljid3477@163.com



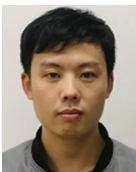
¹Benying Wu, dipl.ing.građ.
wubenyng163@163.com
Autor za korespondenciju



¹Prof.dr.sc. Xiwu Zhou
408680014@qq.com



¹Bo Wang, dipl.ing.građ.
BoWang1127@qq.com



²dr.sc. Wenchao Zhang
1350392000@qq.com

¹ Sveučilište Foshan, Foshan, Kina
Škola za transport, građevinarstvo i arhitekturu

² Sveučilište Tongji, Šangaj, Kina
Odjel za inženjerstvo mostova

Prethodno priopćenje

[Jingdong Liu, Benying Wu, Xiwu Zhou, Bo Wang, Wenchao Zhang](#)

Ponašanje AB stupova zaštićenih aluminijskom pjenom zatvorenih ćelija (CAF) različitih debljina u slučaju udara

S obzirom na to da sudari brodova u mostove mogu uzrokovati ozbiljna oštećenosti dijelova stupa, u radu je istražen zaštitni učinak aluminijske pjene zatvorenih ćelija (CAF) na armiranobetonskim (AB) stupovima. Ispitivan je utjecaj CAF-a različitih debljina na otpornost na udare uzoraka AB stupa analizirajući udarnu silu, pomak, deformaciju armature, ostale dinamičke odzive uzoraka AB stupa, te razinu oštećenosti AB stupova pomoću ultravisokog sustava za ispitivanje udarom čekića. Rezultati pokazuju da je materijal CAF-a bio u linearnoj elastičnoj fazi kada je brzina udara bila unutar 0,76 do 1,14 m/s. Kada su debljine povećane s 50 mm na 75 mm i 100 mm, udarna sila i pomaci testirani iz dvije skupine uzoraka pokazali su sve veći pad. Materijal CAF-a promatran je u fazi popuštanja kada je vrijednost brzine udara bila unutar 1,14 do 1,98 m/s. U tim je uvjetima materijal CAF-a pokazao najbolju potrošnju energije i apsorbirao udarnu energiju u gotovo stalnoj fazi naprezanja, a udarna je sila ostala približno konstantna. U ovom istraživanju otkriveno je da u uvjetima visokog energetskeg udara, materijali CAF-a s većim debljinama odgađaju ulazak u fazu očvršćivanja što rezultira boljom kontrolom lateralnih dinamičkih odziva AB stupova.

Ključne riječi:

konstrukcija mosta, sprječavanje sudara, aluminijska pjena zatvorenih ćelija (CAF), horizontalni udar, otpornost na udare

Research Paper

[Jingdong Liu, Benying Wu, Xiwu Zhou, Bo Wang, Wenchao Zhang](#)

Impact performance of RC piers protected by closed-cell aluminium foam (CAF) of different thicknesses

Considering ship–bridge collisions can cause serious damage to pier components, we investigated the protective effect of closed-cell aluminium foam (CAF) on reinforced concrete (RC) piers. The effect of CAFs with different thicknesses on the impact resistance of RC pier specimens was studied by analysing the impact force, displacement, reinforcement strain, other dynamic responses of RC pier specimens, and the damage degree of RC piers using an ultrahigh drop hammer impact test system. The results show that the CAF material was in a linear elastic stage when the impact velocity was within 0.76 to 1.14 m/s. When the thicknesses were increased from 50 mm to 75 mm and 100 mm, the impact force and top displacements tested from the two groups of specimens showed an increasing amount of decline. The CAF material was observed to be at a yield platform stage when the value of the impact velocity was within 1.14 to 1.98 m/s. Under these conditions, the CAF material exhibited the best energy consumption and absorbed the impact energy in a nearly constant stress stage, while the impact force remained approximately constant. This study discovered that under high-energy impact conditions, CAF materials with larger thicknesses delayed entry into the densification stage, resulting in better control of the lateral dynamic responses of RC piers.

Key words:

bridge structure, collision prevention, closed-cell aluminium foam (ACF), horizontal impact, crashworthiness

1. Uvod

Brzi razvoj gospodarstva i trgovine u posljednjih nekoliko godina rezultirao je povećanim brodskim prijevozom i propusnosti tereta, uz povećanje broja sudara brodova u mostove što je rezultiralo financijskim gubicima i žrtvama [1-3]. Otpornost na udare armiranobetonskih (AB) stupova važan je pokazatelj ukupne sigurnosti mostova zbog njihove nosive funkcije tijekom izgradnje mosta [4-6]. Iako je nekoliko istraživača poboljšalo i ispitalo mostove i druge građevine kako bi se smanjila šteta uzrokovana sudarom vozila i brodova [7-11], zaštitne konstrukcije od dodatnih zaštitnih materijala pokazale su se prikladnijima [12]. Svojstva aluminijske pjene zatvorenih ćelija (engl. *closed-cell aluminium foam* - CAF) protiv sudara privukla su značajnu pozornost istraživača zbog njihove sposobnosti da apsorbiraju više udarne energije, produže vrijeme sudara brodova putem odbojnika i rasipanja energije, smanje silu udara na brodove i učinkovito štite sigurnost i stupova i brodova [13-15].

Kao novi inženjerski materijal, CAF zbog svoje jedinstvene strukture pokazuje mnoga izvrsna svojstva. Zasad je većina istraživanja u Kini i na međunarodnoj razini o CAF-u usmjerena na eksperimentalne procjene njegovih statičkih i dinamičkih mehaničkih svojstava. Prema ovim istraživanjima, tlačni proces materijala CAF-a prolazi kroz tri različite faze: linearnu elastičnost, plastično područje i fazu očvršćivanja [16, 17]. Promatranjem tih triju faza otkriveni su visoki i široki platoi u jednoosnim tlačnim eksperimentima CAF-a, pri čemu se znatna energija apsorbira u konstantnim stanjima naprezanja tijekom tlačnog procesa. Utvrđeno je da se kapacitet potrošnje energije povećava s proširenjem te platforme [18-20]. U eksperimentalnim ispitivanjima tlaka i posmika CAF-a u nazovistatičkim uvjetima, Xueyan i dr. [21] uočili su da povećanje veličine pora CAF-a povećava naprezanje na granici popuštanja materijala u istim uvjetima gustoće. Shakibanezhad i dr. [22] proveli su kvazistatička tlačna ispitivanja na aluminijskim pjenama niske, srednje i visoke gustoće i utvrđeno je da se povećanjem gustoće pjene, deformacija smanjila, a druga mehanička svojstva (kao što su modul elastičnosti, naprezanje na granici popuštanja materijala, naprezanje i kapacitet apsorpcije energije) su se povećala. Li i dr. [23] proučavali su mehaničko ponašanje CAF-a pri dvoosnom opterećenju i proveli su tlačno-posmična ispitivanja promjenom kuta opterećenja. Rezultati su pokazali da CAF pod dvoosnim opterećenjem ima jako naprezanje na granici popuštanja materijala te da gustoća CAF-a znatno utječe na njegova mehanička svojstva u tlaku i posmiku.

Istraživanja o statičkim mehaničkim svojstvima CAF-a pokazuju da su materijali CAF-a idealni plastični materijali za raspršivanje energije s visokom učinkovitošću apsorpcije energije i prikladnim plastičnim silama za drobljenje čime se naglašava mogućnost primjene CAF-a u području zaštite od udara mostovnih stupova. Dinamička mehanička svojstva CAF-a određuju opseg i dubinu njihove primjene u praksi. U prethodnim istraživanjima o kombinaciji CAF-a i armiranobetonskih elemenata, CAF je

pokazao izvrsno amortizirajuće ponašanje. Binchao i dr. [24] proučavali su dinamička tlačna svojstva i otpornost na udare male brzine materijala CAF-a. Rezultati su pokazali da je utjecaj amortizacije visokoporoznog CAF-a bio očit, a morfologija deformacije bila je slična onoj kod nazovistatičkih deformacija. Sun i dr. [25-28] istraživali su ponašanje sendvič-panela od aluminijske pjene u uvjetima niske brzine i eksplozivnog udara. Rezultati su pokazali da su promjene u materijalu bile vrlo osjetljive na snagu udara i laminaciju te na gradijente jezgri od aluminijske pjene. U ovom radu također je uočeno da gradijenti gustoće sendvič panela CAF-a znatno utječu na deformaciju otkazivanja. Liu i dr. [29] proučavali su protueksplozivnu izvedbu čelične žičane mreže i kompozitnih zidova ojačanih CAF-om. Rezultati su pokazali da su otkazivanja i bočni pomaci visokoučinkovitih kompozitnih zidova ojačanih CAF-om smanjeni pod eksplozivnim udarnim opterećenjima u različitim razinama. Xia i dr. [30] proveli su eksperimentalna ispitivanja zaštitnih učinaka CAF materijala s različitim gradijentima gustoće na betonskoj ploči. Rezultati su pokazali da povećanje gradijenta gustoće može poboljšati protueksplozivna svojstva materijala od aluminijske pjene, dok smanjenje gradijenta gustoće ima tendenciju smanjenja učinkovitosti materijala od aluminijske pjene. Lin i dr. [31] proučavali su protueksplozivno ponašanje AB ploča zaštićenih CAF-om otkrivši da je protueksplozivno ponašanje betonskih ploča poboljšano povećanjem debljine CAF materijala. Cong i dr. [32] istražili su mjere zaštite za AB stupove pod udarnim opterećenjem i utvrdili da je šteta na stupovima sa zaštitom CAF-a manja od oštećenosti stupova bez zaštite. Ying i dr. [33] ispitali su učinke oštećenosti betonskih ploča kada su slojevi za zaštitu od aluminijske pjene bili dostupni ili nedostupni. Povećanje debljine zaštitnog sloja CAF-a pokazalo se kao učinkovita metoda za smanjenje pomaka pregledanih AB ploča, kao i stupnja oštećenosti. Yong i dr. [34] predložili su strukturu punjenja CAF-a kako bi se zaštitili stupovi mosta od visokog rizika udarnog opterećenja zbog valjanog kamena. Wu i dr. [35] koristili su ispitivanje klatnom i metode analize konačnih elemenata za provođenje usporednih eksperimentalnih istraživanja na stupovima mosta za sprječavanje sudara koji uključuju CAF različitih debljina i struktura. Rezultati navedenog istraživanja potvrdili su da su posebna strukturna svojstva materijala CAF-a imala jasan zaštitni učinak u slučaju pojedinačnog udara na stupove mosta. Dongfeng [36] je proveo ispitivanja udara klatna na stupove mosta zaštićene uređajima za zaštitu od CAF-a i analizirao zakonitosti utjecaja materijala CAF-a na AB stupove.

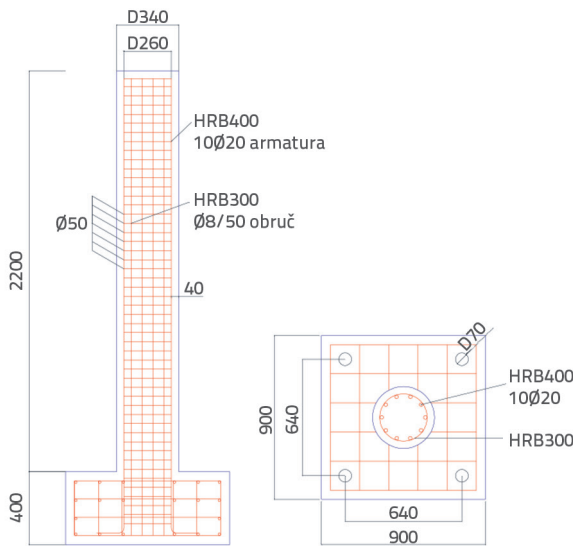
Iako su provedena brojna istraživanja na dinamička svojstva materijala CAF-a i njihove kombinacije s betonskim konstrukcijama, studije o primjeni CAF-a u izbjegavanju sudara u stupove AB mosta ostaju ograničene. Eksperimenata koji simuliraju sudare brodova uz pomoć poprečnog udara kolica također ima relativno malo. Prethodna istraživanja pokazala su da promjena uvjeta udara može lako utjecati na otpornost CAF-a na stupovima [37, 38], s horizontalnim testovima udara

koji su provedeni kako bi se riješio ovaj problem. Polazeći od uvjeta udara i utjecaja promjene debljine CAF-a, analiziran je utjecaj promjene svakog parametra na dinamički odziv stupova pod udarom.

2. Pregled procesa ispitivanja

2.1. Parametri testiranih uzoraka

Procesi ispitivanja u ovom istraživanju temelje se na usporednoj eksperimentalnoj metodi s cilindričnim stupom koji se koristi kao prototip za projektiranje i izgradnju šest modela stupova u dvije skupine u omjeru 1:5 prema načelu sličnosti. Kako bi se osigurala točnost rezultata ispitivanja, korištene su tri različite debljine materijala CAF-a s dvije različite gustoće za zaštitu od udara dviju skupina AB stupova.



Slika 1. Shematski prikaz uzorka (jednica: mm)

Modeli stupa, izrađeni od betona C40, imali su promjere presjeka stupova koji iznose 340 mm i visoki su 2200 mm. Uzdužna armatura izrađena je od vruće valjanih rebrastih čeličnih šipki s granicom popuštanja od 400 MPa (HRB400); na svaki model stupa primijenjeno je deset komada uzdužne armature. Uzdužna

armatura simetrično je postavljena duž kružnog presjeka. Spone su napravljene od uobičajene armature s granicom popuštanja od 300 MPa (HPB300) i promjerom 8 mm. Za spajanje armatura primijenjena je metoda zavarivanja. Slika 1. prikazuje armaturu jednog stupa, a slika 2. prikazuje odabrane materijale CAF-a koji se koriste za ispitivanja.

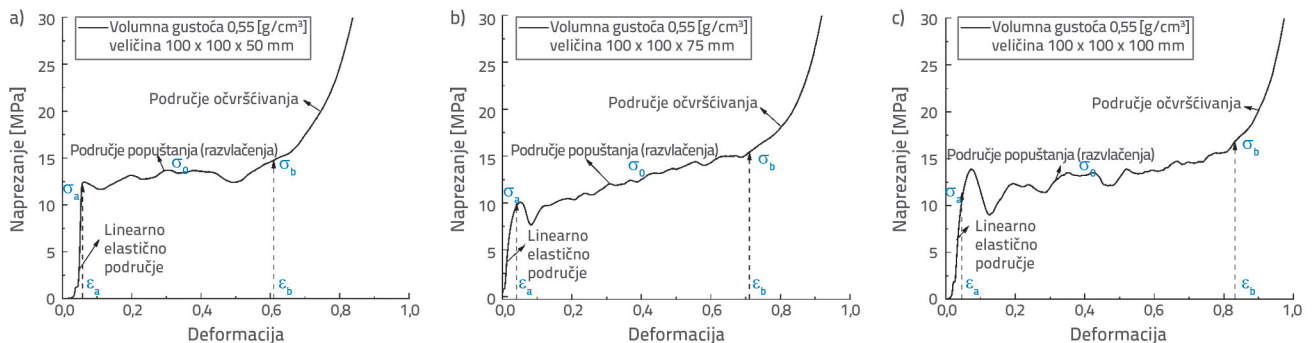
Materijal CAF-a proizveden je u Christie Foam Metal Co., LTD (Suzhou, Kina) (slika 2.). Za ispitivanje tlačnih mehaničkih svojstava CAF-a odabrane su dvije vrste CAF-a do gustoće 0,55 g/cm³ i 0,65 g/cm³ do za jednoosno tlačno ispitivanje. Slika 3. prikazuje uređaj za ispitivanje. Krivulje naprezanje-deformacija dobivene iz testova prikazane su na slici 4. Radi praktičnosti u kasnijem opisu, ovdje je naveden smjer unošenja opterećenja u CAF, koji je isti kao smjer u kojem se mijenja debljina.



Slika 2. Zaštitni materijali CAF različitih debljina



Slika 3. Tlačna ispitivanja CAF-a



Slika 4. Krivulje tlačno naprezanje-deformacija CAF-a, veličine su: a) 100 x 100 x 50 mm; b) 100 x 100 x 75 mm; c) 100 x 100 x 100 mm

Tablica 1. Parametri materijala CAF-a

Materijal br.	Volumenska gustoća [g/cm ³]	Dimenzija [mm]	Naprezanje na platou popuštanja [MPa]	Deformacija u fazi očvršćivanja	Apsorpcija energije [J]
A1	0,55	210×100×50	12,87	0,40	7285
A2	0,55	210×100×75	12,92	0,65	10927
A3	0,55	210×100×100	12,65	0,82	14570
A4	0,65	210×100×50	17,34	0,36	10478
A5	0,65	210×100×75	17,64	0,66	15717
A6	0,65	210×100×100	17,87	0,84	20956

Tablica 2. Svojstva materijala za armaturu

Kategorija armature	Promjer armature [mm]	Granica popuštanja [MPa]	Grafična čvrstoća [MPa]	Modul elastičnosti E [MPa]
HRB400	20	486	640	2,00×10 ⁵

Tablica 4. Parametri modela

Razred betona	Vrijednost tlačne čvrstoće [MPa]	Modul elastičnosti E [MPa]
C40	44,83	3,28×10 ⁴

Tablica 3. Mehanička svojstva betona

Skupina	Uzorak br.	Uzdužna armatura HRB400	Stremen HPB300	Razred čvrstoće betona	Broj CAF-a korišten za uzorak
1. skupina	Z1-20	10Ø20	Ø8/50	C40	A1
	Z2-20	10Ø20	Ø8/50	C40	A2
	Z3-20	10Ø20	Ø8/50	C40	A3
2. skupina	Z4-20	10Ø20	Ø8/50	C40	A4
	Z5-20	10Ø20	Ø8/50	C40	A5
	Z6-20	10Ø20	Ø8/50	C40	A6

Kao što se vidi na slici 4., naprezanje popuštanja ostalo je približno nepromijenjeno kada su se debljine materijala CAF-a povećale s 50 mm na 75 mm i 100 mm. Međutim, duljine platformi popuštanja bile su malo povećane, zajedno s povećanjem naprezanja očvršćivanja. Kada je debljina CAF-a povećana na 100 mm, stupanj očvršćivanja pokazao je sporiju tendenciju rasta u usporedbi s fazama očvršćivanja na debljinama CAF-a koje iznose 50 mm i 75 mm. Rad **W** koji su izvršile deformacije i naprezanje na platou popuštanja σ_0 dobiven je prema vrijednostima naprezanje-deformacija, prema [39]:

$$W = \int_0^{\epsilon_b} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (1)$$

gdje **W** predstavlja rad apsorbiran tijekom deformacije materijala CAF-a, σ upućuje na nisku vrijednost naprezanja materijala CAF-a, a ϵ_b predstavlja deformaciju materijala CAF-a.

$$\sigma_0 = \frac{\int_{\epsilon_a}^{\epsilon_b} \sigma(\epsilon) d\epsilon}{\epsilon_b - \epsilon_a} \quad (2)$$

gdje σ_0 predstavlja naprezanje na platou elastičnosti, σ_a označava naprezanje na granici elastičnosti, ϵ_a označava deformaciju na granici popuštanja i ϵ_b označava deformaciju CAF-a u fazi očvršćivanja.

Na temelju ovog istraživanja, parametri materijala CAF-a određeni su izrazima (1) i (2) te su navedeni u tablici 1.

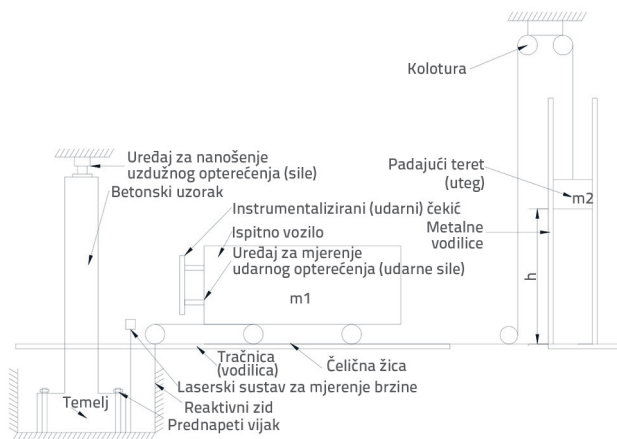
Armatura odabrana za ispitivanje uzorkovana je i opterećena na elektrohidrauličnom servo-univerzalnom stroju za ispitivanje da bi se dobila svojstva materijala za armaturu, kao što su čvrstoća popuštanja i vrijednosti čvrstoće pri slomu, kako je navedeno u tablici 2.

Istodobno je pripremljeno ukupno dvanaest ispitnih kocki (150 x 150 x 150 mm) prema pokusnim zahtjevima za provođenje tlačnih ispitivanja uzoraka. Mehanička svojstva betona navedena su u tablici 3., a parametri modela u tablici 4.

2.2. Uređaj za ispitivanje

Ispitni uređaj za nanošenje opterećenja, primijenjen u ovom istraživanju, bio je višenamjenski sustav za ispitivanje udarom čekića s ultravisokim padom. Sustav za ispitivanje sastojao se

od vertikalnog padajućeg čekića i horizontalnog modela malog broda (slika 5.). Načelo uređaja za testiranje bilo je mijenjati visinu padajućeg tereta i protuutega kako bi se prilagodila energija udarca modela broda. Nakon toga se slobodno padajuće tijelo čekića za ispuštanje koristilo da bi se model broda vodoravno pomaknuo, tj. sudario s modelima stupa duž postavljene trase. Čekić za ispuštanje podignut je na maksimalnu visinu od 18 m, a njegova je masa bila od 166 kg do 1500 kg. Osim toga, masa modela udarnog broda iznosila je 1200 kg, a masa modela broda mogla se mijenjati pomoću protuutega. Projektirana protuteža čekića za ispuštanje bila je 216 kg u ovom ispitivanju. Kruti dio udarnog broda učvršćen je materijalom CAF-a, kao što je prikazano na slici 6. S laserskim sustavom za mjerenje brzine, postavljenim na kraju fiksne trase, vrijednosti udara trenutačne brzine mogu se precizno izmjeriti. Brzina udara modela broda (kinetička energija) povezana je s visinom i masom podizanja čekića, kao i masom modela broda.



Slika 5. Višenamjenski sustav stroja za ispitivanje udarom čekića s ultravisokim padom

Primjerci stupa postavljeni su na krutu podlogu i osigurani pomoću četiri prednapeta vijka, što se može aproksimirati kao kruti spoj na nosač. Gornji kraj stupa bio je podvrgnut aksijalnoj tlačnoj sili od 250 kN pomoću hidraulične preše montirane na okvirnu gredu, kao što je prikazano na slici 7. Čekić za ispuštanje podignut je na projektiranu visinu nakon ugradnje RC uzorka stupa pomoću čeličnog užeta spojenog na udarni čekić koji je stegnut tijekom ovog procesa. Tijekom ispitivanja oslobađa se čekić za ispuštanje i model plovila ga povlači kako bi utjecao na uzorke pri različitim brzinama. U donjim i srednjim područjima uzoraka ravnomjerno je odabrano 20 mjernih točaka duž smjera visine svakog uzorka s rešetkastim rasporedom bočne duljine 5 cm odabranom na svakoj mjernoj točki kako bi se poboljšala točnost mjerenja, kao što je prikazano na slici 8. Za sve testove provedene u ovom istraživanju, točka udara bila je 1100 mm iznad baze stupa. Visina i položaj udarne točke bili su jednaki nacrtu u skladu s položajima i raspodjelom poznatih udarnih sila u sudarima brodova u mostove.

2.3. Prikupljanje podataka

Ispitivanja su osmišljena kako bi se istražili mehanizmi oštećenosti i dinamički odgovori dviju skupina AB stupova pod bočnim udarnim opterećenjima primjenom američkog NI sustava prikupljanja podataka koji se koristi za prikupljanje podataka o udarnoj sili, pomaku i deformaciji armature uzoraka. Filtar Savitzky-Golay korišten je za smanjenje dinamičkog prikupljanja podataka. Metoda filtriranja temelji se na lokalnoj polinomskoj prilagodbi najmanjih kvadrata u vremenskoj domeni koja može filtrirati šum i osigurati da oblik i širina signala ostanu nepromijenjeni istovremeno, što ga čini prikladnim za dinamičku obradu vremenskih podataka. Uz detaljnije upute, vodoravni pomak uzorka mjereno je senzorom pomaka KTC-200 s rasponom od 200 mm. Vrijednost otpora mjeraca deformacije



Slika 6. Zaštitni materijal CAF na testnom vagonu (vozilu)

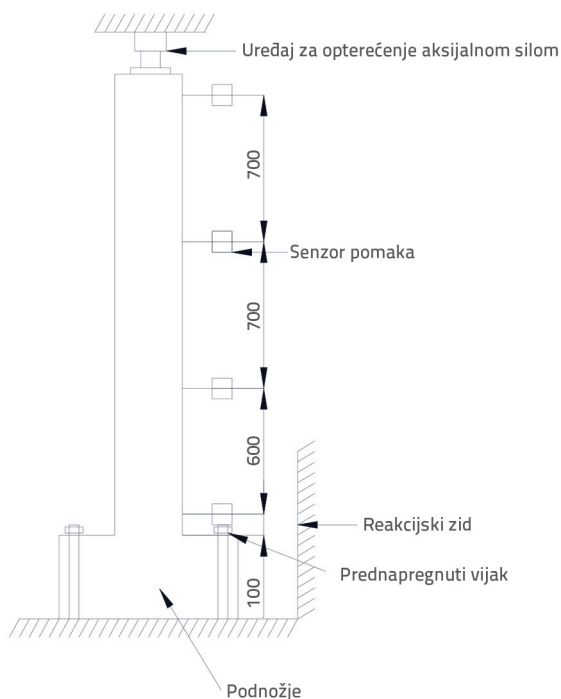


Slika 7. Uzorci izloženi udaru i rubni uvjeti

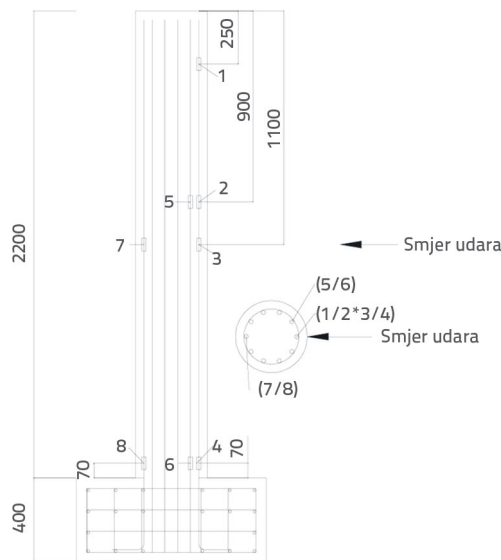


Slika 8. Testirana područja uzoraka

čelične šipke je 120 Ω. Za mjerenje udarne sile u rasponu od 0 do 6 285 kN korišten je tlačni senzor postavljen na glavu udarnih kolica, čime su ispunjeni zahtjevi za mjerenje velikih udarnih sila. Kako bi se istražilo ukupno naprezanje armature, na uzorke se rasporedilo osam mjerača deformacije armature, a njihova raspodjela prikazana je na slici 9. Četiri mjerača pomaka postavljena su sa stražnje strane uzoraka na 100, 800, 1500 i 2100 mm od vrha do dna kako bi se prikupilo bočno pomicanje stupova mosta kao što je prikazano na slici 10. Mjerači pomaka služili su za prikupljanje podataka o bočnom pomaku AB stupova. Oštećenje područja otkazivanja AB stupova testirano je pomoću betonskog ultrazvučnog detektora ZHC-U81.



Slika 9. Prikaz mjerne točke deformacije armature (jedinica: mm)



Slika 10. Prikaz mjernih točaka pomaka (jedinica: mm)

2.4. Shema udara

Eksperimentalni protokol uključivao je devet udara za svaki uzorak stupa; odgovarajuća shema prikazana je u tablici 5. Na temelju načela očuvanja energije, brzina udara teoretskog modela broda može se izraziti na sljedeći način:

$$m_2gh = \frac{1}{2}(m_1 + m_2)v_i^2 + \mu m_1gh \tag{3}$$

U izrazu (3) m_1 označava masu (kg) modela broda, a m_2 masu tereta za ispuštanje; g je ubrzanje gravitacije (9,81 m/s²); h je visina na kojoj se nalazi čekić za ispuštanje (m); μ je koeficijent trenja između modela broda i vodilice (tračnice) određen testom bez opterećenja. U ovom radu, za različite vrijednosti m_1 i h , koeficijent trenja dobiven tijekom ispitivanja bio je oko 0,12.

Tablica 5. Shema udara stupa

Broj udara	Visina za ispuštanje padajućeg tereta [m]	Masa broda [kg]	Masa padajućeg tereta [kg]	Teoretska brzina [m/s]	Izmjerena prosječna brzina [m/s]	Brzina promjene brzine [%]	Akumulacija energije [J]
1	0,7	1200	216	0,77	0,76	1,30	606
2	1	1200	216	0,93	0,96	-3,23	1574
3	1,5	1200	216	1,14	1,14	-0,09	2939
4	2	1200	216	1,32	1,32	-0,38	4768
5	2,6	1200	216	1,50	1,54	-2,67	7258
6	3,5	1200	216	1,74	1,76	-1,15	10511
7	4,5	1200	216	1,97	1,98	-0,51	14627
8	5,5	1200	216	2,18	2,21	-1,38	19756
9	6,6	1200	216	2,39	2,43	-1,67	25956

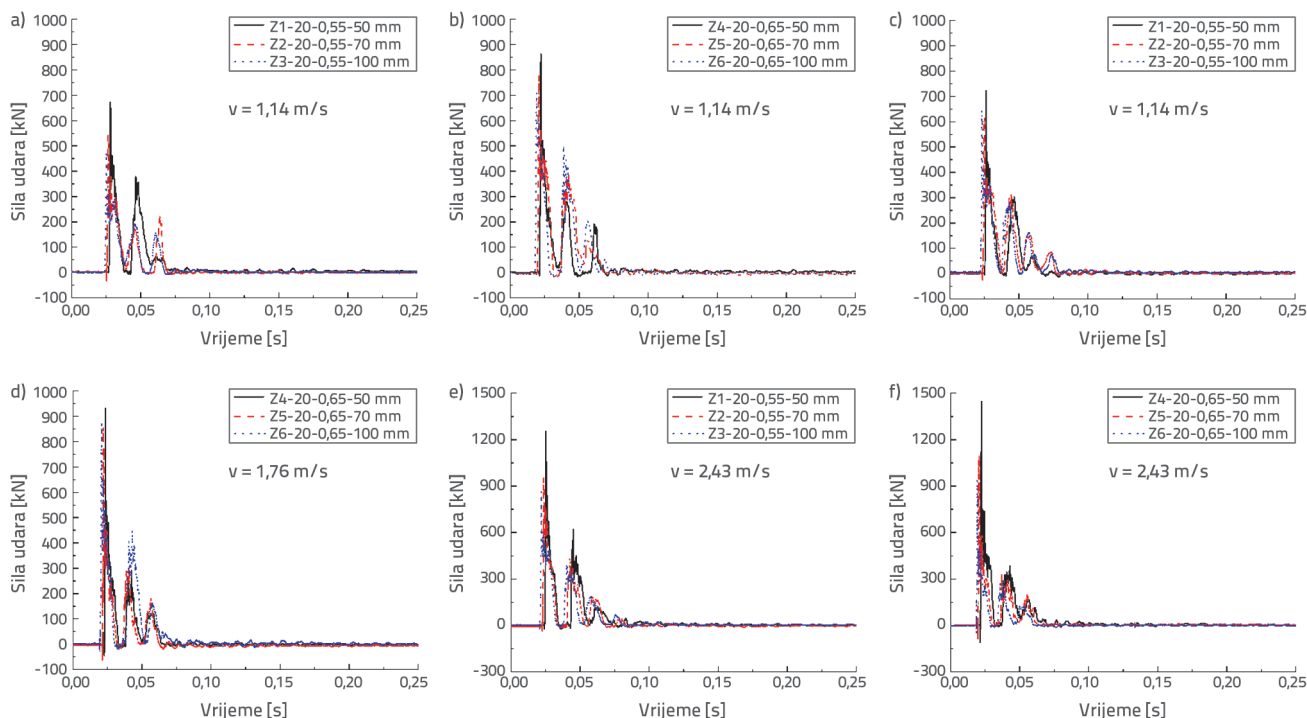
3. Rezultati ispitivanja i analize

Podaci vezani uz dinamički odziv AB stupova zaštićenih materijalima CAF-a različitih debljina dobiveni su pomoću ispitivanja horizontalnim udarom. Analizirani su odgovori AB stupova u vidu pomaka i udarnih sila, deformacije armature, situacije oštećenosti na predmetnim područjima uzoraka te derivacija i širenje pukotina. Zbog kratkog trajanja udara, podaci o odgovoru za promatrano razdoblje korišteni su za prikaz krivulja vremenskog odziva za svako stanje. U sljedećoj su analizi odabrane reprezentativne brzine udara 1,14 m/s, 1,76 m/s i 2,43 m/s te je ispitan utjecaj promjena debljine CAF-a na dinamičke odzive i mehanizme oštećenosti uzoraka stupa pri tim brzinama udara.

3.1. Analiza odziva udarne sile

Krivulje vremenskog odziva kada je model broda udario uzorke pri brzinama 1,14 m/s, 1,76 m/s i 2,43 m/s prikazane su na slici 11.

Prema tlačnom ispitivanju CAF-a prikazanom na slici 4., krivulje naprezanja i deformacije CAF-a prolaze kroz tri faze. Prva je bila linearno elastična faza gdje se naprezanje naglo povećalo s deformacijom, a krivulja je bila otprilike ravna; druga je bila faza platoa popuštanja gdje se volumen CAF-a smanjio i naprezanje se promijenilo unutar stabilnog raspona; posljednja je bila faza očvršćivanja gdje je volumen CAF-a bio pritisnut do granične vrijednosti i deformacija je bila mala, ali je naprezanje naglo poraslo. Rezultati ispitivanja vršne udarne sile dviju skupina



Slika 11. Krivulje vremenskog odziva za udarne sile

Tablica 6. Usporedba rezultata ispitivanja udarom

Broj udara	Brzina udara [m/s]	1. skupina			2. skupina		
		Vršna udarna sila [kN]			Vršna udarna sila [kN]		
		Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
1	0,76	220,33	185,19	123,84	300,91	227,77	209,52
2	0,96	482,72	349,72	291,60	681,28	561,23	490,07
3	1,14	651,58	510,44	467,99	865,21	783,56	710,98
4	1,32	664,03	559,81	518,27	872,24	798,73	742,45
5	1,54	680,48	618,14	612,65	896,25	836,63	806,94
6	1,76	701,97	619,28	643,18	932,12	860,01	880,42
7	1,98	763,25	674,10	712,28	961,25	873,60	906,45
8	2,21	961,39	764,42	811,21	1104,56	890,56	928,30
9	2,43	1223,08	929,49	835,47	1446,17	1104,67	936,92

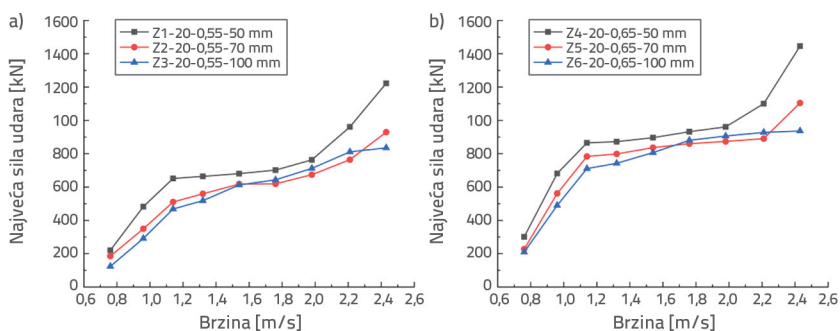
stupova međusobno su uspoređeni kako bi se bolje shvatio utjecaj varijacije debljine materijala CAF-a na vršnu udarnu silu stupova. Podaci o udarnim silama u šest skupina uzoraka, prikupljeni u devet udara prikazani su u tablici 6.

Kada je brzina udarca bila 1,14 m/s, ukupna udarna energija bila je 2939 J, sa svim CAF-ovima u fazi područja popuštanja. Kao što je prikazano na slikama 11.a i 11.b, vršna vrijednost udarne sile uzoraka stupa smanjila se povećanjem zaštitne debljine CAF-a.

Kada se debljina CAF-a smanjila s 50 na 75 mm, vršna sila smanjila se za 9,44 % u prvoj skupini, a u drugoj za 21,66 %. Kada se debljina CAF-a povećala sa 75 mm na 100 mm, vršna sila smanjila se za 8,32 % u prvoj skupini, odnosno 9,26 % u drugoj skupini. U usporedbi s debljinom od 50 mm, vršna sila CAF-a na 100 mm pokazala je očitu razliku. Vršne sile u prvoj skupini uzoraka CAF-a smanjile su se za 28,18 %, odnosno 17,83 % u drugoj skupini. Osim toga, pod istim uvjetima debljine, gustoća CAF-a povećala se s 0,55 g/cm³ na 0,65 g/cm³, a vršna udarna sila povećala se za 29,49 do 39,43 %. Stoga je gore navedena analiza dovela do sljedećih zaključaka: 1. U istim uvjetima gustoće vršna udarna sila postupno se smanjivala povećanjem debljine CAF-a u usporedbi sa zaštitom debljine 50 mm. Za iste debljine i gustoće, zaštitni učinci materijala od aluminijske pjene s većom gustoćom su smanjeni jer je krutost materijala CAF-a s većom gustoćom nešto veća od krutosti materijala CAF-a s manjom gustoćom.

Kada je brzina udara bila 1,76 m/s, ukupna udarna energija bila je 10.511 J. Kao što je prikazano na slikama 11.c i 11.d, nakon određenog broja kumulativnih udara, vršna udarna sila fluktuirala je u malom rasponu s promjenom u zaštitnoj debljini CAF-a. Nakon tri vrste zaštite CAF-a povećane debljine, vršna udarna sila prve skupine smanjila se za 11,78 % i -3,86 %, a druge skupine smanjila za 7,74 % i -2,37 %. Pod zaštitom od 100 mm CAF-a u usporedbi s 50 mm CAF-a, vršna sila dviju skupina smanjila se za 8,38 %, odnosno 5,55 %. Usporedba navedenih rezultata pokazuje da se elastičnost stupa pogoršava nakon što dođe do određene količine oštećenosti, a što je pokazatelj da učinci CAF-a nisu uvijek bili bolji s dodatnom debljinom te da bi prekomjerne razine debljine mogle čak i povećati udarnu silu uzoraka stupa.

Kada je brzina udarca bila 2,43 m/s, ukupna udarna energija dosegla je 23 956 J, a materijali CAF-a ušli su u fazu očvršćivanja. Kao što je prikazano na slici 11.e i 11.f, amplitude udarnih sila uzoraka Z1 i Z4 bile su znatno veće od onih kod uzoraka Z2, Z3, Z5 i Z6. Ovi rezultati upućuju na to da je CAF debljine 50 mm prije ušao u fazu očvršćivanja i smanjio plastične deformacije te povećao krutost, što je rezultiralo postupnim gubitkom učinka amortizacije. Zbog toga se udarna sila na uzorke ne može smanjiti. Nadalje, udarna sila dviju skupina uzoraka nastavila se smanjivati u



Slika 12. Krivulje vršne udarne sile -brzina

prosijeku za 12,65 % kada je debljina CAF-a povećana sa 75 na 100 mm, što upućuje na to da je 100 mm debljine materijala CAF-a superiorno u smanjenju udarne sile u uvjetima velike akumulacije udarne energije.

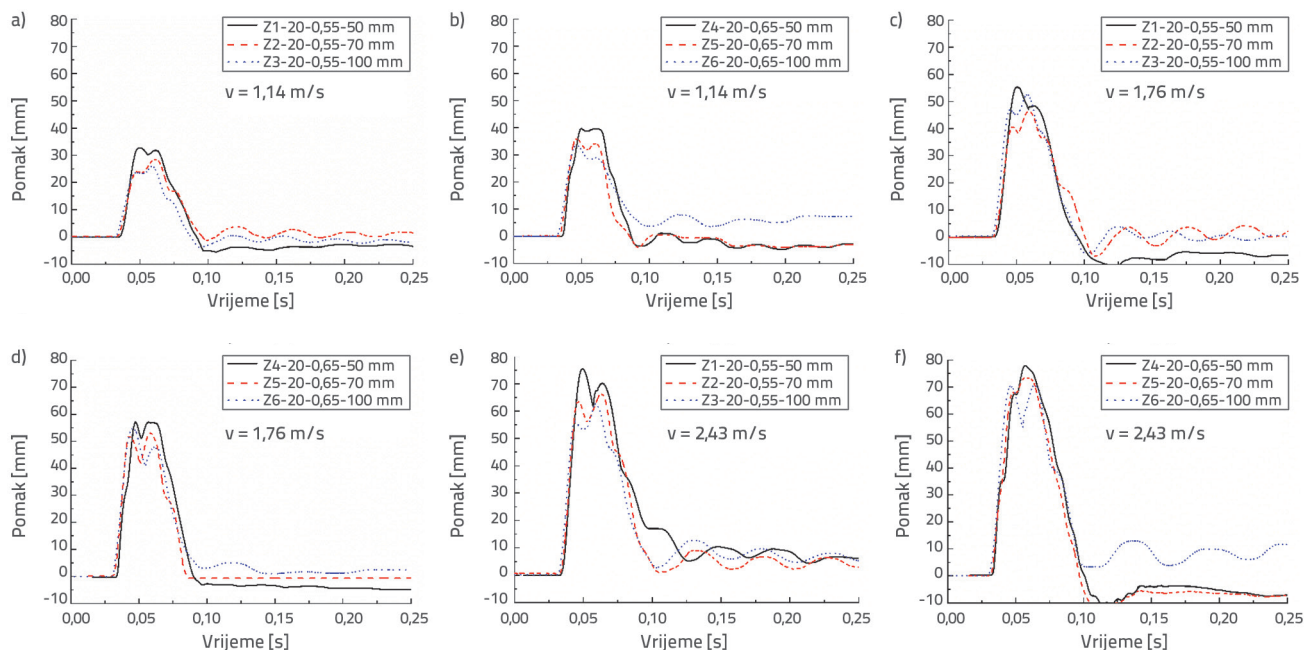
Dvije skupine izmjerenih vršnih vrijednosti udarne sile i brzina udara navedenih u tablici 6. postavljene su na krivulje udarna sila-brzina, kao što je prikazano na slici 12.

Općenito, kao što je prikazano na slici 12. i tablici 6., s povećanjem brzine udara, trendovi promjene udarne sile u dvije skupine uzoraka bili su približno isti, s promatranom pojavom u tri faze. U prvoj fazi, kada se brzina udara povećala sa 0,76 m/s na 1,14 m/s, maksimalna udarna sila se povećala približno linearno s povećanjem brzine udara jer je materijal CAF-a još uvijek bio u linearnoj fazi elastičnosti i pokazivao je slabe učinke rasipanja energije u tom stanju. Tijekom druge faze, maksimalne vrijednosti udarne sile ostale su relativno stabilne kako se brzina udara povećala u rasponu od 1,14 m/s do 1,98 m/s zbog CAF-a koji je ušao u fazu platoa popuštanja u tom trenutku tijekom kojeg je pokazao svoju najbolju sposobnost potrošnje energije te mogao apsorbirati udarnu energiju u približno stalnom stanju naprezanja. Međutim, kada je brzina udara dviju skupina uzoraka dosegla 1,98 m/s, odnosno 2,21 m/s, izlomljena linija na dijagramu upućuje na to da je materijal CAF-a ušao u treću fazu zbog utjecaja akumulacije energije i prelaska CAF-a iz faze platoa popuštanja u fazu očvršćivanja.

Tijekom faze očvršćivanja, kapacitet apsorpcije energije materijala CAF-a brzo se smanjio. Zaključno, tri faze promjena udarne sile bile su u skladu s krivuljama naprezanja i deformacije dobivenim kvazistatičkim jednoosnim tlačnim ispitivanjima CAF-a, kao što je prikazano na slici 4.

3.2. Rezultati analize odgovora na pomake

Kako bi se prikazale promjene u bočnom pomaku AB stupova sa zaštitom CAF-a različitih debljina, kao predstavnici za analizu rezultata usporedbe pomaka stupova pod udarnim opterećenjima odabran je gornji pomak stupova. Kada su brzine udara bile 1,14 m/s, 1,76 m/s i 2,43 m/s, krivulje vremenskog odziva za gornje pomake dviju skupina uzoraka prikazane su na slici 13.



Slika 13. Krivulje vremenskog odziva gornjih pomaka

Kada brzina udara dosegne 1,14 m/s, vršni pomak uzoraka stupa smanjuje se kako se povećava zaštitna debljina CAF-a. Kao što je prikazano na slikama 13.a i 13.b, kada se debljina CAF-a u prvoj skupini povećala s 50 na 75 mm, njegov se pomak smanjio za 6,16 mm (17,75 %). Kada se debljina CAF-a poveća s 50 mm na 100 mm, njegov se pomak smanjuje za 8,83 mm (25,44 %). Kada se debljina CAF-a poveća sa 75 mm na 100 mm, njegov se pomak smanjuje za 2,67 mm (9,35 %). Rezultati za drugu skupinu uzoraka bili su slični, ali raspon promjene pomaka bio je nešto manji. Osim toga, pod istim uvjetima debljine, gustoća CAF-a povećala se s 0,55 g/cm³ na 0,65 g/cm³, a vršni pomak povećao se za 9,45 % do 12,21 %. Stoga su, prema rezultatima proračuna vršnih vrijednosti pomaka AB stupova sa zaštitom CAF-a na tri debljine, odgovarajuća povećanja debljine CAF-a bila su pogodna za smanjenje odziva pomaka AB stupova. Međutim, nisu uočene velike razlike u opadajućim amplitudama smanjenih stopa s povećanjem debljine CAF-a, što upućuje na to da se odziv pomaka AB stupova može optimizirati na idealan raspon razumnim odabirom debljine CAF-a.

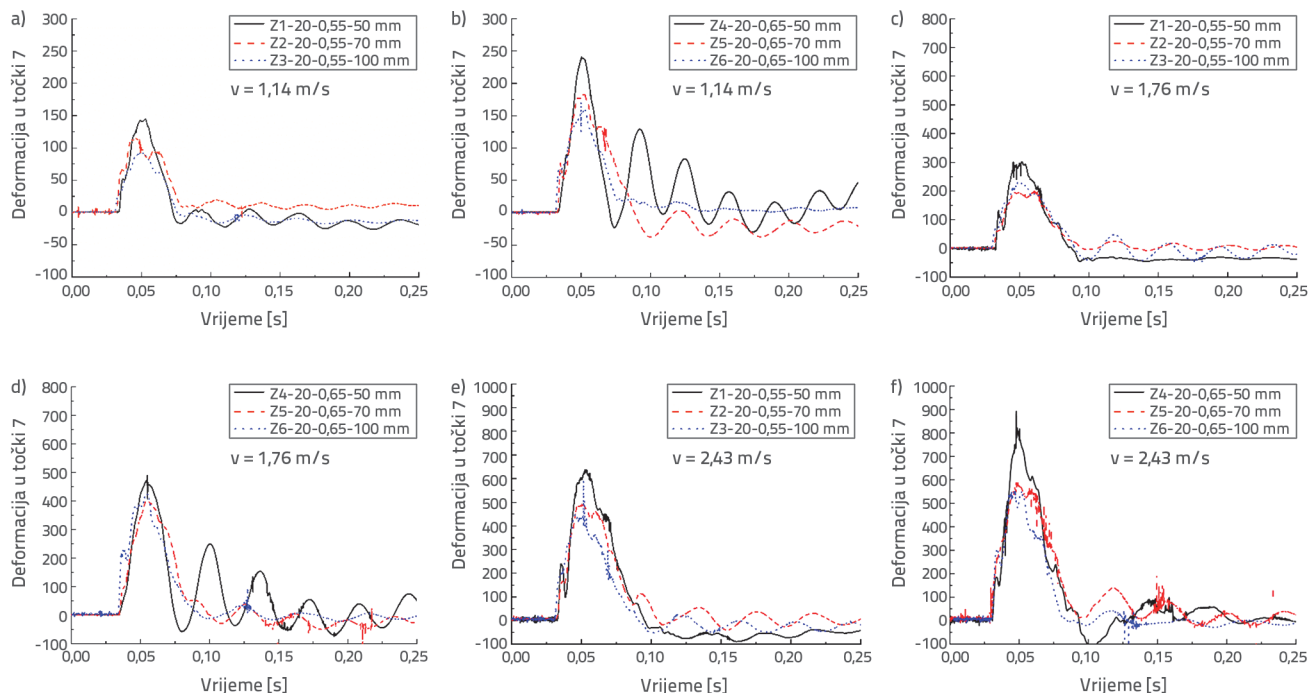
Kada brzina udara dosegne 1,76 m/s, a debljina materijala CAF-a raste s 50 mm na 75 mm, dolazi do smanjenja pomaka koje iznosi 9,18 mm u prvoj skupini uzoraka, odnosno 4,83 mm u drugoj skupini uzoraka pri čemu dolazi do smanjenja koje iznosi 16,57 %, odnosno 8,47 % (slike 13.c i 13.d). Kada se debljina uzoraka poveća sa 75 mm na 100 mm, smanjenje pomaka uzoraka u prvoj skupini iznosi -6,25 mm, odnosno -2,53 mm u drugoj skupini uzoraka, što predstavlja smanjenje od -13,52 % odnosno -4,85 %. Prema navedenim podacima, vršne vrijednosti pomaka uzoraka stupova Z3 i Z6 zaštićenih materijalom CAF-a debljine 100 mm bile su veće od vrijednosti uočenih kod AB stupova Z2 i Z5 zaštićenih materijalom CAF-a debljine 75 mm. Na primjer, pomaci prve skupine povećali su se za 13,54 %, a

pomaci druge skupine za 4,85 %. Ovi rezultati nadalje upućuju na to da povećanje debljine materijala CAF-a povećava odziv na pomak na vrhovima AB stupova.

Kada brzina udara dosegne 2,43 m/s, analiziranjem slike 13.e i 13.f vidi se da su vršne vrijednosti gornjeg pomaka u prvoj skupini uzoraka (Z1-20, Z2-20 i Z3-20) bile 74,97 mm, 65,68 mm i 62,61 mm. Vršne vrijednosti gornjih pomaka u drugoj skupini uzoraka (Z4-20, Z5-20 i Z6-20) bile su 79,20 mm, 73,96 mm i 70,74 mm. Stoga ovi rezultati upućuju na to da su vršne vrijednosti pomaka uzoraka stupova Z3 i Z6 zaštićenih materijalom CAF-a debljine 100 mm bile niže od vršnih vrijednosti pomaka uzoraka stupova Z2 i Z5 zaštićenih materijalom CAF-a debljine 75 mm. Ukratko, kada se debljina CAF-a povećala sa 75 na 100 mm, pomaci dviju skupina uzoraka smanjili su se za 4,51 %. Dakle, ovi rezultati upućuju na to da bi se reakcije stupova na bočne pomake mogle bolje kontrolirati pomoću debljeg CAF-a u uvjetima velike udarne energije.

3.3. Rezultati analize napreznja armature

Odziv armature na deformaciju u uzorcima stupova različitih debljina zaštićenih CAF-om analiziran je pomoću krivulje deformacije armature br. 7 na stražnjoj strani udarne točke stupa koja se smatra reprezentativnom. Slika 14. prikazuje deformacijske krivulje vremenskog odziva dviju skupina uzoraka pri brzinama udara koje iznose 1.14 m/s, 1.76 m/s, i 2.43 m/s. Na slikama 14.a i 14.b prikazan je odgovor napreznja armatura br. 7 koja se nalaze iza udarnih točaka stupa s promjenama debljine zaštite CAF-om pri brzini udara od 1,14 m/s. Vršna napreznja armature na promatranoj točki 7 smanjila su se s povećanjem debljine zaštitnog materijala CAF-a. Na primjer, kada se debljina CAF-a povećala s 50 na 75 mm, vrijednosti



Slika 14. Deformacijske krivulje vremenskog odziva armature na točki promatranja broj 7

vršnih naprezanja dviju skupina uzoraka smanjile su se u prosjeku za 21,56 %. Međutim, kada se debljina povećala sa 75 na 100 mm, vršne vrijednosti naprezanja u prosjeku su se smanjile samo za 16,87 %. Ovi rezultati pokazuju na to da su odgovarajuća povećanja debljine zaštitnog materijala CAF-a korisna za smanjenje deformacijskog odgovora armature kod uzoraka stupa.

Na slikama 14.c i 14.d prikazan je deformacijski odgovor armature br. 7 koja se nalazi iza udarnih točaka uzoraka stupa s promjenama debljine zaštite CAF-om. Kao što je prikazano na slici 14., vršne vrijednosti deformacije armature kod uzoraka stupova Z3 i Z6 koje štiti CAF debljine 100 mm veće su od onih kod uzoraka stupova Z2 i Z5 zaštićenih CAF-om debljine 75 mm. Stoga su navedeni rezultati pokazali da su se razine deformacije dviju skupina uzoraka povećale za 10,09 % kada se debljina CAF-a povećala sa 75 na 100 mm, što upućuje na to da, pod uvjetom određene udarne energije, prekomjerna debljina CAF-a povećala je deformacijski odziv armature AB stupova rezultirajući negativnim učincima.

Na slikama 14.e i 14.f prikazana je usporedba deformacijskog odziva armatura br. 7 koje se nalaze iza udarnih točaka uzoraka stupa s promjenama debljine zaštite CAF-a pri brzini udara od 2,43 m/s. Kao što je prikazano na slici 14., vršne vrijednosti deformacija armature kod uzoraka stupova Z1 i Z4 sa zaštitom od 50 mm debelog materijala CAF-a bile su veće od vrijednosti kod čeličnih šipki kada je brzina udara bila 1,76 m/s. Kada se debljina CAF-a povećala s 50 na 75 mm, deformacija armature dviju skupina uzoraka smanjila se u prosjeku za 26,07 %. Štoviše, kada se debljina povećala sa 75 na 100 mm, deformacija armature smanjila se u prosjeku za

7,14 %, što dodatno upućuje na to da je materijal CAF-a malih debljina izgubio sposobnost amortizacije pod utjecajem kumulativnih učinaka. Međutim, materijali CAF-a velikih debljina još uvijek mogu kontrolirati deformacijski odgovor armature AB stupova.






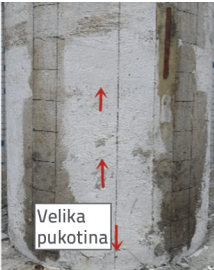


















3.4. Nastanak loma i analiza načina sloma

Konačni stupnjevi oštećenosti područja velike štete (područja na dnu stupova i područja u blizini udarnih točaka) svakog uzorka nakon kumulativnih udara navedeni su u tablici 7.

U tablici 7. lijeva i desna prednja područja predstavljaju područja ispod strana gdje se nalaze udarne točke. Kao što je prikazano u tablici 7., različite razine pukotina od bočnog savijanja bile su prisutne u donjim područjima koja se nalaze ispred udarnih točaka dviju skupina stupova. Osim toga, dio drobljenja betona pojavio se u donjim područjima koja se nalaze iza udarnih točaka. U prvoj skupini uzoraka opažene su pukotine pod kutom od 45° u područjima koja se nalaze ispod strana udarne točke stupa Z3 u prvoj skupini uzoraka; slično tome, u drugoj skupini uzoraka opažene su pukotine pod kutom od 45° u područjima koja se nalaze ispod strana pogođene točke.

Tablica širenja pukotina pokazuje da su se pukotine u početku počele razvijati u donjim područjima pogođenih površina. Velike pukotine pojavile su se na mjestima u blizini baze AB stupova kada se brzina udara povećala na određenu razinu. Uzorci Z1, Z2 i Z4 zaštićeni materijalom debljine 50 mm i 75 mm CAF-a imali su pukotine samo na donjim prednjim područjima, s raspodjelom tih pukotina sličnim pukotinama u AB gredama tijekom loma izazvanog savijanjem. Stoga se,

Tablica 7. Pukotine u područjima s velikim oštećenjima stupova

Grupa	Uzorak	Lijeva strana udarne točke	Dno udarne točke s prednje strane	Dno udarne točke sa stražnje strane	Desna strana udarne točke
1. skupina	Z1-20		 Velika pukotina	 Smrvljeni beton	
	Z2-20		 Velika pukotina	 Smrvljeni beton	
	Z3-20		 Velika pukotina	 Smrvljeni beton	
2. skupina	Z4-20		 Velika pukotina	 Smrvljeni beton	
	Z5-20		 Velika pukotina	 Smrvljeni beton	
	Z6-20		 Velika pukotina	 Smrvljeni beton	

u kombinaciji s popuštanjima betona na dnu udarnih točaka i dokazima o drobljenju betona na dnu uzoraka, smatra da su uzorci Z1, Z2 i Z4 podlegli lomu izazvanom savijanjem. U međuvremenu, kod uzoraka Z3, Z5 i uzorka Z6 zaštićenih materijalom debljine 75 mm i 100 mm CAF-a, uočene su ukošene pukotine pod kutom od 45° u područjima koja se nalaze lijevo i desno od udarnih točaka. Te su se pukotine protezale ukoso od područja u blizini udarnih točaka do dna stupova i bile su slične tipičnim posmičnim pukotinama. Stoga, prema tablici širenja pukotina, posmične pukotine pojavljuju se nakon pukotina izazvanih savijanjem i polako se razvijaju. Prema tome, za uzorke Z3, Z5 i Z6 smatralo se da su podlegli lomovima izazvanim savijanjem i posmikom.

U skladu s rezultatima analize prve skupine uzoraka, širine loma uzoraka Z1 i Z2 pod istim uvjetima utjecaja energije bile su 0,64 mm, odnosno 0,35 mm, sugerirajući da bi se razvoj pukotina u AB stupovima mogao učinkovito usporiti povećanjem debljine CAF-a unutar odgovarajućeg raspona. Međutim, u usporedbi s uzorcima Z2 i Z3, kada su debljine CAF-a povećane sa 75 mm na 100 mm, širine pukotina uzoraka proširile su se s 0,35 mm na 0,56 mm. Kada je brzina udara dosegla 2,21 m/s, u uzorku Z3 zaštićen materijalom CAF-a debljine 100 mm pojavile su se kose pukotine. Ovi rezultati upućuju na to da su promjene debljine CAF-a utjecale na razvoj širine pukotina u uzorcima i promijenile načine otkazivanja AB stupova pod istom udarnom energijom. Rezultati za drugu skupinu stupova pokazali su da je razvoj glavnih pukotina na prednjim dijelovima stupova bio sličan onima u prvoj skupini. Međutim, u AB stupovima pojavile su se posmične pukotine kada se debljina CAF-a povećala s 50 mm na 75 mm. Stoga se smatralo da prekomjerna gustoća druge skupine stupova zaštićenih CAF-om negativno utječe na njihovu sposobnost zaštite.

3.5. Analiza oštećenosti betonskog stupa

Promjene akustičkih parametara uzoraka nakon oštećenosti mjerene su pomoću ultrazvučnog detektora oštećenosti, kako je navedeno u tablici 8. Nakon oštećenosti uzoraka, putevi širenja ultrazvučnih valova promijenili su se i postali kraći zbog prisutnosti pukotina, povećavajući vrijeme širenja ultrazvuka - što se odražava kao smanjenje brzine zvuka. Tijekom eksperimentalnih ispitivanja provedenih u ovom istraživanju, ukupna šteta na AB stupovima procijenjena je pomoću prosjeka vrijednosti izmjerenih u 40 točaka u područjima s velikim oštećenjem [40-42].

Rezultati u tablici 8. upućuju na određenu pravilnost u varijaciji brzine zvuka. Na primjer, kako se brzina udara povećava, brzina vala progresivno je manja, dok se smanjenje brzine vala povećava kako se povećava brzina udara. U ovom radu uspješno je analizirana prva skupina uzoraka stupa. Kada je brzina udara dosegla 1,32 m/s, kumulativna smanjenja brzine zvuka za uzorke Z1, Z2 i Z3 bila su 0,096, 0,071, odnosno 0,059 km/s. Kumulativno smanjenje brzine zvuka smanjilo se kada se povećala debljina CAF-a, što upućuje na to da je povećanje debljine CAF-a u uvjetima udarne energije smanjilo oštećenje uzoraka AB stupa. Usporedba stope promjene brzine zvuka uzoraka Z2 i Z3 za 9,03 %, odnosno 10,99 %, pokazala je da je stupanj oštećenosti betona uzorka Z3 bio veći od stupnja oštećenosti uzorka Z2 kada je brzina udara dosegla 2,43 m/s. Stoga se smatralo da je, pod utjecajem te energije, povećanje debljine CAF-a sa 75 mm na 100 mm izazvalo oštećenje betonskih uzoraka, što je u skladu sa zakonitošću pod kojom se razvijaju pukotine, a to pak pokazuje na to da bi prekomjerna debljina CAF-a mogla negativno utjecati na uzorke stupa. Rezultati analize druge skupine uzoraka stupova pokazali su da je trend oštećenosti betona uzoraka s obzirom na povećanje debljine CAF-a sličan onom u prvoj skupini.

Tablica 8. Varijacije ultrazvučnih brzina u područjima velikih oštećenosti betonskih stupova

Skupina	Uzorak	Brzina udara [m]	Prosječna brzina zvuka (km/s)		Ukupno smanjenje brzine zvuka [km/s]	Promjena brzine zvuka [%]
			Prije udara	Nakon udara		
1. skupina	Z1-20	0,76	4,208	4,199	0,672	15,97
		0,96	4,199	4,183		
		1,14	4,183	4,155		
		1,32	4,155	4,112		
		1,54	4,112	4,05		
		1,76	4,05	3,958		
		1,98	3,958	3,867		
		2,21	3,867	3,699		
		2,43	3,699	3,536		

Tablica 8. Varijacije ultrazvučnih brzina u područjima velikih oštećenosti betonskih stupova - nastavak

Skupina	Uzorak	Brzina udara [m]	Prosječna brzina zvuka [km/s]		Ukupno smanjenje brzine zvuka [km/s]	Promjena brzine zvuka [%]
			Prije udara	Nakon udara		
1. skupina	Z2-20	0,76	4,04	4,032	0,365	9,03
		0,96	4,032	4,018		
		1,14	4,018	4,001		
		1,32	4,001	3,969		
		1,54	3,969	3,925		
		1,76	3,925	3,877		
		1,98	3,877	3,828		
		2,21	3,828	3,777		
		2,43	3,777	3,675		
	Z3-20	0,76	4,102	4,097	0,451	10,99
		0,96	4,097	4,084		
		1,14	4,084	4,069		
		1,32	4,069	4,043		
		1,54	4,043	4,00		
		1,76	4,00	3,924		
		1,98	3,924	3,845		
		2,21	3,845	3,747		
		2,43	3,747	3,651		
2. skupina	Z4-20	0,76	4,178	4,157	1,136	27,19
		0,96	4,157	4,097		
		1,14	4,097	4,024		
		1,32	4,024	3,891		
		1,54	3,891	3,761		
		1,76	3,761	3,611		
		1,98	3,611	3,455		
		2,21	3,455	3,266		
		2,43	3,266	3,042		
	Z5-20	0,76	4,1	4,084	0,853	20,80
		0,96	4,084	4,054		
		1,14	4,054	4,012		
		1,32	4,012	3,941		
		1,54	3,941	3,84		
		1,76	3,84	3,754		
		1,98	3,731	3,599		
		2,21	3,599	3,457		
		2,43	3,457	3,247		

Tablica 8. Varijacije ultrazvučnih brzina u područjima velikih oštećenosti betonskih stupova - nastavak

Skupina	Uzorak	Brzina udara [m]	Prosječna brzina zvuka (km/s)		Ukupno smanjenje brzine zvuka [km/s]	Promjena brzine zvuka [%]
			Prije udara	Nakon udara		
2. skupina	Z6-20	0,76	4,131	4,118	0,921	22,29
		0,96	4,118	4,092		
		1,14	4,092	4,062		
		1,32	4,062	4,005		
		1,54	4,005	3,891		
		1,76	3,891	3,749		
		1,98	3,749	3,597		
		2,21	3,597	3,414		
		2,43	3,414	3,21		

4. Zaključak

U ovom radu uspoređene su i proučavane dvije skupine običnih AB stupova zaštićenih materijalom CAF-a različitih debljina. Za uzorke su mnogo puta ponovljena ispitivanja horizontalnog udara, a analizirani su dinamički odgovori, uključujući udarne sile, pomake, deformacije armature, pukotine i oštećenosti betona u uvjetima horizontalnog udara. Materijali CAF-a postavljeni su u različitim fazama otkazivanja podešavanjem brzine udara i proučavani su zasebno. Iz ovog istraživanja proizlaze sljedeći zaključci:

- Tijekom prve faze, s brzinom udara unutar 0,76 do 1,14 m/s, materijal CAF-a bio je u linearnoj elastičnoj fazi, a rasipanje energije CAF-a je bilo slabo u tom stanju. Prikładna povećanja debljine CAF-a smanjila su odgovore uzorka stupa na udar. Uočeno je da su stope promjene deformacija armature i promjene ultrazvučnih oštećenosti uzoraka male. Općenito, učinci utjecaja i odgovarajuće dinamičke promjene u dvije skupine uzoraka bili su približno isti tijekom prve faze.
- Tijekom druge faze, materijal CAF-a ušao bi u fazu platoa popuštanja, pri čemu je brzina udara bila u rasponu od 1,14 m/s do 1,98 m/s. Najbolji učinci rasipanja energije uočeni su tijekom ove faze: CAF je mogao apsorbirati udarnu energiju u gotovo stalnom stanju naprezanja. Utvrđeno je da se povećavaju stope promjene deformacije armature i ultrazvučnog oštećenosti betona. Prekomjerno povećanje debljine CAF-a povećalo je deformaciju armature i vršnu udarnu silu.
- Tijekom treće faze, u kojoj je brzina udara bila u rasponu od 1,98 m/s do 2,21 m/s, dijagram izlomljenih linija pokazao je jasne promjene, što upućuje na to da je materijal CAF-a konačno ušao u fazu očvršćivanja. Udarne sile u obje skupine znatno su se povećale. Gornji pomaci i brzina promjene ultrazvučnih oštećenosti betona uzoraka u dvije skupine bili su visoki, povećavajući dinamičke reakcije AB konstrukcija. Štoviše, kada se povećala udarna energija, materijal CAF-a s

većom debljinom mogao je bolje kontrolirati bočne dinamičke reakcije stupova.

- Povećanjem gustoće materijala CAF-a od 0,55 g/cm³ do 0,65 g/cm³ zaštitni su učinci stupova bili oslabljeni. Na primjer, kada se maksimalna udarna sila povećala na 29,49–39,43 %, vršne vrijednosti pomaka povećale su se za 9,45–12,21 %, a stope promjene ultrazvučnih oštećenosti AB stupova znatno su se povećale.

Zaključno, ovim istraživanjem utvrđeno je da je odabir odgovarajuće debljine CAF-a prema očekivanoj udarnoj energiji od presudne važnosti kada se koristi kao materijal za zaštitu AB stupova. Odgovarajuće debljine CAF-a pogodovale su kontroli dinamičkih reakcija uzoraka AB stupova podvrgnutih udarnom opterećenju. Međutim, prekomjerne debljine obično slabe ili čak smanjuju zaštitne učinke zbog povećane konstrukcijske cjelovitosti. Ovo eksperimentalno istraživanje daje preporuku za primjenu CAF-a kao zaštite od udara i drugih aspekata mostova. Osim toga, istraživanja o CAF-u u ovom istraživanju još uvijek su u eksperimentalnoj fazi. S obzirom na visoku učinkovitost apsorpcije energije, malu težinu i dobru trajnost CAF-a, njegova primjena u mostovima nudi značajne izgleda za razvoj. Zasad se materijali CAF-a uglavnom upotrebljavaju za zaštitu vozila i vojnih objekata, dok je njihova primjena u zaštiti mostova i drugih građevinskih objekata ograničena. Kombiniranje materijala CAF-a s postojećim sustavima za sprječavanje sudara kako bi se razvile praktične komponente pogodne za zaštitu mostova ključno je za popularizaciju CAF-a u građevinarstvu.

Zahvala

Ovo istraživanje sponzorirali su Veliki projekt (prirodne znanosti) Odjela za obrazovanje provincije Guangdong (2014KZDXM064), Projekt inovacija u znanosti i tehnologiji Odjela za obrazovanje provincije Guangdong (2013KJCX0188) i Centar za istraživanje tehnologije građevinarstva provincije Guangdong.

LITERATURA

- [1] Goerlandt, F., Kujala, P.: On the reliability and validity of ship do ship collision risk analysis in light of different perspectives on risk. *Science Direct*, 62 (2014), pp. 348-365.
- [2] Zhi-Bin, H., Qi-Zhi, L.: Review and prospect of the ship-bridge collision force, *Journal of Foshan University (Natural Science Edition)*, 25 (2007) 5, pp. 35-39.
- [3] Hua, Jm, Jun-Jie, W.: Comments on Vessel Collision Force Protection for American Highway Bridges Determined According to Risk Method[J], *World Bridges*, (2008) 4, pp. 64-67.
- [4] Gholipour, G., Zhang, C., Mousavi, A.A.: Nonlinear numerical analysis and progressive damage assessment of a cable-stayed bridge pier subjected to ship collision, *Marine Structures*, 69 (2020), pp. 102662.
- [5] Gholipour, G., Zhang, C., Li, M.: Effects of soil do pile interaction on the response of bridge pier to barge collision using energy distribution method, *Structure and Infrastructure Engineering*, (2018), pp. 1-15.
- [6] Wu, M., Jin, L., Du, X.: Dynamic responses and reliability analysis of bridge double-column under vehicle collision, *Engineering Structures*, (2020) 221, pp. 1110-1135.
- [7] Gucuyen, E., Kantar, E., Erdem, R.T., et al.: Experimental and Numerical Investigation of Steel Sections under Impact Effect, *GRADEVINAR*, 73 (2021) 1, pp. 45-56, <https://doi.org/10.14256/JCE.2876.2020>
- [8] Erdem, R.T., Kantar, E., Gucuyen, E., et al.: Experimental study on hollow section joints under impact loading, *GRADEVINAR*, 72 (2020) 5, pp. 401-410, <https://doi.org/10.14256/JCE.2776.2019>
- [9] Zhou, X., Zhang, R., Zhao, K., et al.: An experimental study of impact performance of RC piers with different reinforcement ratios, *GRADEVINAR*, 71 (2019) 6, pp. 465-479, <https://doi.org/10.14256/JCE.2305.2018>
- [10] Erdem, R.T., Gucuyen, E.: Non-linear analysis of reinforced concrete slabs under impact effect, *GRADEVINAR*, 69 (2017) 6, pp. 479-487, <https://doi.org/10.14256/JCE.1557.2016>
- [11] Erdem, R.T., Gucuyen, E., Kantar, E., et al.: Impact behaviour of concrete beams, *GRADEVINAR*, 66 (2014) 6, pp. 523-531, <https://doi.org/10.14256/JCE.1034.2014>
- [12] Tkalčević Lakušić, V.: Safety of roadside columns in case of vehicle impact, *GRADEVINAR*, 64 (2012) 4, <https://doi.org/10.14256/JCE.652.2011>
- [13] Jing-You, C., Cheng-Bing, L.I.: Study Progress in Mechanical Properties and Energy Absorption Characteristic of Aluminum Foams, *Development and Application of Materials*, 4 (2013) 21, pp. 1003-1545.
- [14] Mu, Y.L., Wang, D.D., He, Y.D., et al.: Impact Toughness of Closed-Cell Aluminum Foam, *Materials Science Forum*, (2018) 933, pp. 203-208.
- [15] Shan, C.L., Xu, X.J.: Analysis of mechanical properties of pier anti-collision device by sandwich plate 520 with overall curved surface, *Zhongguo Gonglu Xuebao/China Journal of Highway and Transport*, 52(12) 10, pp. 46-54.
- [16] Yang, Y.S., Zhe, Y., et al.: Study on the cushioning property and deformation failure mechanism of close-cell aluminum foam, *Journal of Functional Materials*, 45 (2014) 8.
- [17] Shi, S.Q., Kang, J.G., Sui, S.B.: Experimental Study of Quasi-static and Dynamic Compressive Property of Close-cell Aluminum Foam, *Rare Metal Materials and Engineering*, (2011) s2, pp. 150-154.
- [18] Gibson, L.J., Ashby, M.F.: *CellularSolids: Structure and Properties*, Cambridge University Press, (1997), pp. 203-208.
- [19] Yu, H.J., Li, B., Guo, Z.Q., et al.: Dynamic compressive property of closed-cell aluminum foam with Al matrix and Al-6Si matrix, *Zhongguo Youse Jinshu Xuebao/Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 17 (2007) 5, pp. 704-709.
- [20] Reyes, G.: Static and Low Velocity Impact Behavior of Composite Sandwich Panels with an Aluminum Foam Core, *Journal of Composite Materials*, 42 (2008) 16, pp. 1659-1670.
- [21] Li, X., Li, Z., Zhang, D.: Mechanical Behaviors of Closed-Cell Aluminum Foams under Quasi-Static Compression-Shear Loads, *Gaoya Wuli Xuebao/Chinese Journal of High Pressure Physics*, 32 (2018) 3.
- [22] Shakibanezhad, R., Sadighi, M., Hedayati R.: Numerical and Experimental Study of Quasi-Static Loading of Aluminum Closed-Cell Foams Using Weaire-Phelan and Kelvin Tessellations, *Transport in porous media*, 142 (2022) 1-2, pp. 229-248.
- [23] Li, Z.B., Li, X.Y., Zheng, Y.X.: Biaxial mechanical behavior of closed-cell aluminum foam under combined shear-compression loading, *Transactions OF Nonferrous Metals Society OF China*, 30 (2020) 1, pp. 41-50.
- [24] Li, B.C., Zhao, G.P., Lu, T.J.: Low strain rate compression behavior of high porosity closed-cell aluminum foams, *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 43 (2011), pp. 122-135.
- [25] Sun, G., Wang, E., Zhang, J., et al.: Experimental study on the dynamic responses of foam sandwich panels with different facesheets and core gradients subjected to blast impulse, *International Journal of Impact Engineering*, (2019) 135, pp. 103327.
- [26] Wang, E., Li, Q., Sun, G.: Computational analysis and optimization of sandwich panels with homogeneous and graded foam cores for blast resistance, *Thin-Walled Structures*, (2020) 147, pp. 106494.
- [27] Huo, X., Sun, G., Zhang, H., et al.: Experimental study on low-velocity impact responses and residual properties of composite sandwiches with metallic foam core, *Composite Structures*, (2019) 223(SEP), pp. 110835.1-110835.20.
- [28] Sun, G., Wang, E., Wang, H., et al.: Low-velocity impact behaviour of sandwich panels with homogeneous and stepwise graded foam cores, *Materials & Design*, (2018) 160(DEC.), pp. 1117-1136.
- [29] Liu, J., Wu, C., Li, C., et al.: Blast testing of high performance geopolymer composite walls reinforced with steel wire mesh and aluminium foam, *Construction and Building Materials*, (2019) 197, pp. 533-547.
- [30] Xia, Y., Wu, C., Liu, Z.X., et al.: Protective effect of graded density aluminium foam on RC slab under blast loading-an experimental study, *Construction and Building Materials*, (2016) 111, pp. 209-222.
- [31] Lin, Y., Shun-Feng, G., Wei-Liang, J.: Investigation on anti-explosion performance of reinforced concrete slab with composite protective aluminum foam, *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 43(2009) 2, pp. 376-379.
- [32] Zhu, C.: Dynamic response and damage mechanism of reinforced concrete structures under 562 crash, Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [33] Gao, H., Liu, Z., Yang, Y., Wu, C., Geng, J.: Blast-resistant performance of aluminum foam-protected reinforced concrete slabs, *Explosion Andshock Waves*, 39 (2019) 2, pp. 30-41.

- [34] Wu, Y., He, S.M., Li, X.P., et al.: Study on elliptic anti rock-fall impact structure with double energy dissipation layers wrapping up pier eccentrically in mountains, *Engineering Mechanics*, 34 (2017) 10, pp. 158-167.
- [35] Zulie, W.U.T.: Experimental Research of Pier with Foam Aluminum Protection Devices, *Structural Engineers*, 25 (2009) 3, pp. 125-130.
- [36] Xu, D.F.: Application of Aluminum Foam Protection Device in Bridge Pier Collision Avoidance, Chongqing, Jiaotong University, Chongqing, China, 2006.
- [37] Zhou, X., Zhang, W., Wang, X., et al.: Experimental Study on the Impact Resistance of Closed-Cell Aluminum Foam Protective Materials to RC Piers under Lateral Impact, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021.
- [38] Zhou, X., Zhang, H., Zhang, W., et al.: Study on the Influence of Closed-Cell Aluminum Foam on the Impact Performance of Concrete Pier after Equal Replacement with Stainless Steel Reinforcement, *Advances in Materials Science and Engineering*, (2020) 19, pp. 1-17.
- [39] Li, Q., Magkiriadis, I., Harrigan, J.: Compressive strain at the onset of densification of cellular solids, *568 Cell. Plast*, 42 (2006) 5, pp. 371-392.
- [40] Sellitto, A., Riccio, A., Russo, A., et al.: Ultrasonic Damage Detection of Impacted Long and Short Fibre Composite Specimens, *Key Engineering Materials*, (2020) 827.
- [41] Shirole, D., Hedayat, A., Ghazanfari, E., et al.: Evaluation of an Ultrasonic Method for Damage Characterization of Brittle Rocks, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 4 (2020).
- [42] Patil, S., Reddy, D.M.: Impact damage assessment in carbon fiber reinforced composite using vibration-based new damage index and ultrasonic C-scanning method, *Structures*, 28 (2020), pp. 638-650.