

Primljen / Received: 26.12.2023.

Ispravljen / Corrected: 18.10.2024.

Prihvaćen / Accepted: 28.10.2024.

Dostupno online / Available online: 10.3.2025.

Projektiranje predgotovljenih prijenosnih spregnutih betonskih ploča otpornih na eksploziju

Autor:

Izv.prof.dr.sc. **Niyazi Özgür Bezgin**, dipl.ing.grad.

Sveučilište u Istanbulu – Cerrahpaşa, Turska

Građevinski fakultet

ozgur.bezgin@iuc.edu.tr

Autor za korespondenciju

Prethodno priopćenje

Niyazi Özgür Bezgin

Projektiranje predgotovljenih prijenosnih spregnutih betonskih ploča otpornih na eksploziju

Ovaj rad predstavlja pristup projektiranju za predgotovljene spregnute betonske ploče debljine 50 mm koje mogu izdržati tlak uslijed eksplozije nastao upotrebom eksploziva tipa C4 koji djeluje na njihove površine. Spregnuta ploča sastoji se od betonske jezgre visoke čvrstoće koja je spregnuta i postavljena između dviju čeličnih ploča. Projektirana ploča pruža trostupanjsku otpornost na višestruke eksplozije, iskorištavajući svoja konstrukcijska spregnuta svojstva, uključujući otpornost na savijanje, otpornost nastalog oblika lančanice i iskorištavanje koncepta "žrtvovanog" elementa, koji se postiže ograničenim lomom i plastificiranjem njegovih sastavnih dijelova. Ovo istraživanje uvodi načelo "Projekt za višestruku intrinzičnu otpornost" (DeMIR) i raspravlja o rezultatima ispitivanja opterećenja izazvanima eksplozijom izvedenima na projektiranim pločama, uključujući četiri odvojene eksplozije prouzročene eksplozivima C4.

Ključne riječi:

beton visoke čvrstoće, predgotovljenost, spregnute konstrukcije, intrinzična otpornost, otpornost na eksploziju, eksplozivi

Research Paper

Niyazi Özgür Bezgin

Pre-fabricated design of transportable blast resistant composite concrete panels

This study presents a design approach for 50 mm thick prefabricated composite concrete panels capable of withstanding blast pressures from C4-type explosives applied to their surfaces. The composite panel consists of a high-strength concrete core that is shear-bonded and positioned between two steel plates. The designed panel provides three-stage blast resistance against multiple explosions, leveraging its composite structural qualities, including bending resistance, catenary resistance, and sacrificial resistance, which are achieved through the contained fracture and plastification of its material components. This study introduces the principle of "Design for Multiple Intrinsic Resistance" (DeMIR) and discusses the results of blast load tests performed on the designed panels, involving four separate explosions generated by C4 explosives.

Key words:

high-performance concrete, prefabrication, composite design, intrinsic resistance, blast resistance, explosives

1. Uvod

Eksplzivni mogu biti korisni ovisno o njihovoj namjeni. Na primjer, miniranje stijena uobičajeno je u rudarstvu i građevinarstvu. Međutim, eksplozivi se primjenjuju i prilikom provođenja nasilja i terora, pri čemu agresor želi nauditi civilima i vojnom osoblju. Građevinske konstrukcije obično nisu otporne na eksplozije, budući da opterećenja nastala eksplozijom nisu uključena u standardni skup opterećenja za koje su te konstrukcije projektirane. Međutim, određene građevinske konstrukcije - kao što su veleposlanstva, stražarske postaje, prometna čvorišta i financijske zgrade - zahtijevaju otpornost na tlak uslijed eksplozije [1].

Proračun konstrukcije na eksplozive važan je zadatak koji može uključivati jednu ili više svojstava otpornosti konstrukcije. Na primjer, debeli i armirani betonski zid može se proračunati da podnese eksplozije [2, 3]. Takav zid može ostati netaknut pod tlakom eksplozije koju stvaraju određene količine eksploziva detoniranih na određenoj udaljenosti. Međutim, šteta će u konačnici nastati ako udaljenost detonacije, količina eksploziva ili vrsta eksploziva prijeđu određene pragove. U tim je slučajevima cjelovitost zida ugrožena, što dovodi do uništavanja njegovih betonskih elemenata i izlaganja čelika za armaturu [4, 5]. Posljedično, premašuje se konstrukcijska otpornost zida na savijanje i plastično deformiranje, što rezultira njegovim slomom. Navedeno može pojačati učinke eksplozije, budući da fragmentirani materijal sa zida može djelovati kao projektil, uzrokujući daljnju štetu osobama koje je konstrukcija trebala zaštititi, stoga pristup projektiranju koji osigurava konstrukcijsku otpornost unutar spregnutog tijela može biti koristan. Ovakav pristup može omogućiti konstrukciji odgovor na eksplozije na kontrolirani način, s elementima koji apsorbiraju energiju omeđenima visoke vlačne čvrstoće [6]. Nakon iscrpljenja otpornosti zida na eksplozije, ako projektom zida nije sprečeno probijanje otvora na zidu, tlakovi od eksplozije mogu prodrijeti u zaštićeno područje kroz fragmentiranu konstrukciju [7].

Kako bi se poboljšala otpornost zida na veće tlakove koje stvaraju veće eksplozije, sigurnosna zona oko zida može se proširiti kako bi se potencijalne prijetnje držale na većoj udaljenosti ili se može izgraditi deblji zid s jačom armaturom [8, 9]. Međutim, poboljšanje jednog aspekta projektiranja konstrukcijskog elementa dodavanjem više materijala i povećanjem njegove težine kako bi izdržao veći tlak eksplozije možda nije najpoželjniji postupak. Povećanje sigurnosti uz veće troškove izgradnje i na račun smanjene otpornosti konstrukcije nije optimalno rješenje. Konstrukcijske metode za rješavanje problema povezanih s eksplozijama obično se dijele na zaštitu, odvajanje ili prevenciju [10]. Kontekst u kojem se eksplozije događaju – bilo u zatvorenom objektima ili na otvorenom – također značajno utječe na intenzitet tlaka eksplozije [11-13]. Ovaj se rad usredotočuje na eksplozije koje se događaju na otvorenom, a prevencija takvih eksplozija nije obuhvaćena. Zaštita se odnosi na pružanje potpune otpornosti na eksplozije, dok odvajanje uključuje kontrolirano rasipanje, preusmjeravanje

ili izbjegavanje tlakova eksplozije. Ovo je istraživanje u skladu s kategorijama zaštite i odvajanja.

Ovdje se predlaže pristup za obrambene konstrukcije nazvan "Projekt za višestruku intrinzičnu otpornost" (engl. *Design for Multiple Intrinsic Resistanc - DeMIR*). Temelji se na razumijevanju da jedan oblik otpornosti konstrukcije može slijediti prethodni nakon njegovog iscrpljivanja ili se može pojaviti istovremeno. Na primjer, proračunom armiranobetonske ploče zahtijeva se dovoljna otpornost na momente savijanja koje stvaraju opterećenja. Nakon što se prekorači čvrstoća ploče na savijanje, ona otkazuje i dodatna otpornost nije dostupna. U slučaju eksplozije, materijal ploče može se raspasti jer apsorbira energiju eksplozije. Ako energija eksplozije premašuje veličinu koja se može apsorbirati raspadanjem betona, konstrukcija koja pruža otpor može biti ugrožena i neće moći pružiti otpor eksploziji. Međutim, projekt konstrukcije može iskazati različita povoljna svojstva s pomoću materijalnih karakteristika i svoga oblika. Na primjer, uokvireni armiranobetonski zid ne samo da se opire tlačnim i vlačnim naprezanjima te naprezanjima od savijanja i posmika, već također može apsorbirati energiju kroz progresivnu sloma u omeđenim uvjetima nakon iscrpljivanja njegove nosivosti na savijanje.

Ovaj rad istražuje mogućnosti projektiranja spregnutog zida otpornog na eksploziju. Takav zid nudivišestrukeoblikeotpornosti, uključujući otpornost na savijanje, kao armiranobetonska ploča s čeličnim vlaknima, vlačnu otpornost, kao čelični element oblika lančanim integriran u spregnutu konstrukciju s čeličnim pločama i otpornost postignutu apsorpcijom energije tijekom loma betona kao omeđenog zrnatog materijala između čeličnih ploča, ali i otpornost na lom u vlačnoj zoni čeličnih ploča. Sljedeća poglavlja predstavljaju koncepte predgotovljenih spregnutih ploča otpornih na eksploziju, nakon čega slijedi njihov konstrukcijski proračun. Projektirane ploče ispitane su pod stvarnim udarnim opterećenjem u vojnom objektu na otvorenom. Važno je napomenuti da ispitivanja eksplozije nisu provedena u zatvorenom prostoru, pa povećanja tlakova i reflektirani tlakovi nisu uzeti u obzir. Ploče su bile podvrgnute četirima eksplozijama koje su stvorene s pomoću kilograma eksploziva C4. Prikazan je slijed proizvodnje ploča, budući da su proizvedene u civilnoj tvornici. Međutim, fotografiranje testiranih ploča izvršilo je vojno osoblje prema strogim propisima. Tlakovi detonacije procijenjeni su s pomoću vlastitog programa za numeričku analizu, koji je kalibriran stvarnim podacima o tlaku detonacije koji su isključivo u vlasništvu vojske, a pojedini o njima ne mogu se otkriti. Nakon posljednje detonacije autori su pregledali ploče. Zatražene fotografije snimilo je osoblje, od kojih su neke kasnije objavljene i odobrene za upotrebu u ovom istraživanju.

2. Načelo "Projekta za višestruku intrinzičnu otpornost (DeMIR)"

Osnova projektiranja predgotovljenih betonskih ploča otpornih na eksploziju temelji se na principu DeMIR-a. Taj pristup iskorištava

čvrstoće materijala i mehanička ponašanja koja su osigurana projektom konstrukcije. Za projektiranu spregnutu ploču, 100 cm širine, 250 cm visine i 5 cm debljine, početni mehanizam otpornosti jest čvrstoća na savijanje. Sprezanje je postignuto ugradnjom 46 mm betona visokih uporabnih svojstava između dviju čeličnih ploča EN1993-1-1, razreda S355 debljine 2 mm, s granicom razvlačenja $f_y = 355$ MPa i graničnom vlačnom čvrstoćom $f_u = 490$ MPa. Svaka čelična ploča izvedena je s 30 mm dugim moždanicima, promjera 6 mm, izrađenim od čelika za armiranje razreda S420 i zavarenima na čelične ploče na osnom razmaku od 250 mm duž 100 cm širine ploče. Projektirani beton, koji će biti detaljno opisan u sljedećem poglavlju, postavljen je na jednu čeličnu ploču u predviđenoj debljini i zatim prekriven drugom čeličnom pločom, formirajući tako spregnutu ploču. Ovisno o jačini eksplozije, može se primijeniti jedna ili više spregnutih ploča za izvedbu zidova s debljinama koje su višekratnici od 5 cm. Cilj je tog višeslojnog dizajna olakšati popravak nakon udara jednostavnim odvajanjem oštećene ploče od okvira i zamjenom novom predgotovljenom spregnutom pločom.

Iako je otpornost na savijanje koju nudi spregnuta ploča ograničena, nakon što se ona iscrpi, vanjske čelične ploče počinju djelovati kao lančаницe između točaka oslonaca ploča, odupirući se vlaku. Posljedično, ploče mogu nastaviti pružati otpornost na udare, iako kroz različite mehanizme. Nadalje, čelične ploče pridonose dodatnoj otpornosti zbog svoje posmične i vlačne čvrstoće, što se može manifestirati kroz pukotine proboje koje su rezultat udara. Čelične ploče također ovijaju beton, koji možda više nije netaknut. Fragmentirani i dezintegrirani beton ovijen čeličnim pločama još uvijek može izdržati eksplozije i udarce fragmenata putem raspadanja čestica i međusobnog posmika i trenja. Predgotovljena spregnuta ploča zapravo pokazuje tri različita načina otpornosti koji traju sve dok ne dođe do potpunog sloma. Konačni otpor spregnute ploče sličan je otporu vreće s pijeskom.

Slike 1.a, 1.b i 1.c prikazuju karakteristične uzastopne faze otpora spregnute ploče. Tri faze višestrukih unutarnjih otpornosti za ovu ploču su sljedeće:

- Otpornost na savijanje spregnute ploče očituje se na početku.
- Nakon iscrpljenja otpornosti na savijanje, vlačna čvrstoća čeličnih ploča postaje aktivna.

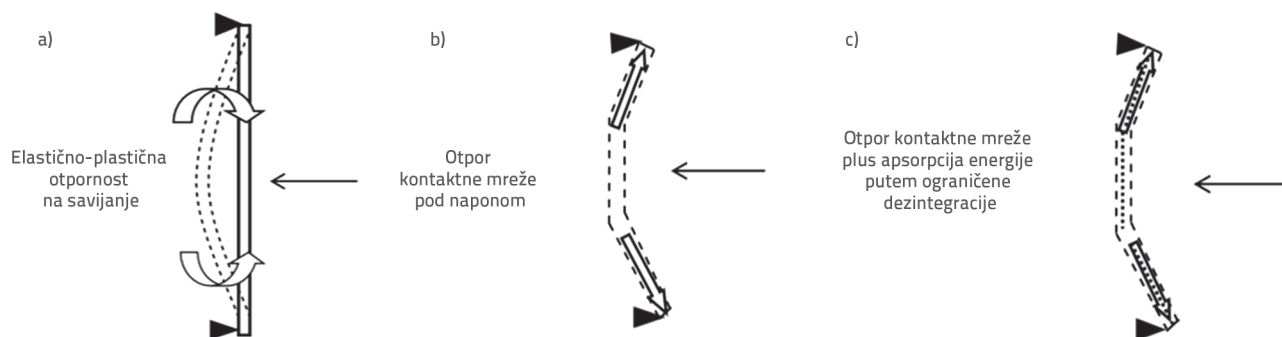
- Kada se u čeličnoj ploči razviju lokalni plastični zglobovi i betonska se jezgra raspadne, aktiviraju se preostala čvrstoća spregnute ploče preko mehanizma lančаницe, kapacitet apsorpcije energije betonske jezgre smještene između ploča i lokalni vlačni slom čeličnih ploča.

3. Projekt betona visoke čvrstoće za predgotovljenu ploču

Predgotovljena spregnuta ploča razvijena je primjenom betona visokih uporabnih svojstava ojačanog čeličnim vlaknima duljine 9 mm. Pokazalo se da povećana energija loma povezana s većim čvrstoćama betona povećava kapacitet apsorpcije energije pri opterećenjima uzrokovanim eksplozijom [14-18]. Karakteristike betona s upotrijebljenim vezivnim mortom važne su za učinkovitu apsorpciju energije [19]. Međutim, ovaj projekt beton zahtijeva dovoljnu obradivost betona za pravilnu ugradnju. Stoga su napravljene probne mješavine kako bi se postigla najveća čvrstoća betona uz laganu ugradnju. Zahtijevano je slijeganje od 4 cm kako bi se osigurala odgovarajuća obradivost za ručnu ugradnju betona unutar oplata pomoću zidarske žlice, a podloga oplata je čelična ploča s kojom se spreže beton. Različiti udjeli materijala navedenih u tablici 1. primijenjeni su za stvaranje pet različitih smjesa.

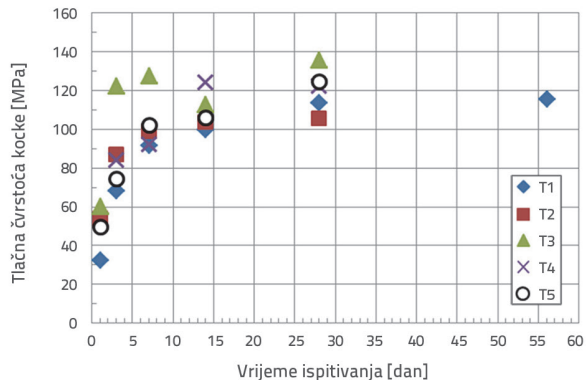
Tablica 1. Sadržaj pete mješavine betona (T5)

Materijal	Gustoća [kg/m ³]	Masa u 1 m ³ betona [kg/m ³]
CEM I 52,5R	3,130	376
Silicijska prašina	2,200	33
Tip F – leteći pepeo	2,120	131
Agregat	2,700	783
Pijesak	2,600	1,066
Plastifikator	1,030	15
Čelična vlakna	7,800	15
Voda	1,000	83
Ukupno	-	2,503

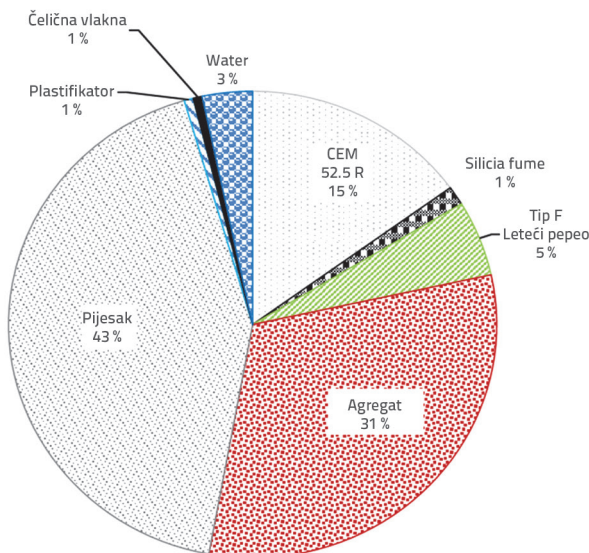


Slika 1. Projekt za mehanizam višestruke intrinzične otpornosti (DeMIR) predgotovljene spregnute ploče: a) Elastoplastična otpornost na savijanje; b) Vlačna otpornost lančаницe; c) Otpornost lančаницe i apsorpcija energije drobljenjem omeđenog betona

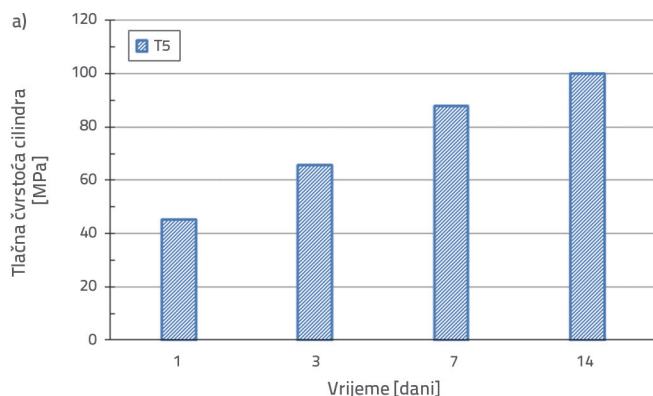
Ispitivanja tlačne čvrstoće provedena su na kockama s rubovima duljine 10 cm, a rezultati su prikazani na slici 2. Za izradu predgotovljenih ploča odabrana je smjesa iz petog ispitivanja (T5), čiji je sadržaj detaljno prikazan u tablici 1. Izmjerena čvrstoća uzorka nakon 28 dana iznosila je $f_{kocka} = 122 \text{ MPa}$.



Slika 2. Vrijednosti tlačne čvrstoće uzorka dobivene iz pet različitih mješavina



Slika 3. Maseni udjeli sastojaka mješavine betona T5



Projekt mješavine T5 omogućio je najveću čvrstoću, optimalnu obradljivost i najnižu cijenu uz primjenu odabranih materijala. Maseni udjeli sastojaka betona prikazani su na slici 3.

Slijedeći specifikacije projektirane smjese, provedena su ispitivanja tlačne čvrstoće na valjkastim uzorcima promjera 15 cm i visine 30 cm, a rezultati su prikazani na slici 4.a. Slika 4.b prikazuje rezultate ispitivanja slijevanja za mješavinu T5. Zbog ograničenja kapaciteta uređaja za hidrauličko ispitivanje s kontrolom sile, ispitivanje tlačne čvrstoće nije se moglo provesti na cilindričnim uzorcima starim 28 dana. Međutim, tlačna čvrstoća uzorka starih 14 dana iznosila je $f_{cyl,14 \text{ dana}} = 102 \text{ MPa}$.

U mješavini betona je primijenjen plastifikator na bazi polikarboksilat etera. Čelična vlakna imala su promjere od 0,18 mm do 0,23 mm i duljine od $13 \pm 1 \text{ mm}$. Veličine zrna primijenjenih bazaltnih agregata varirale su od 5 do 13 mm. Odabran je vodocementni faktor 0,22, s omjerom plastifikatora i vode od 0,18. Upotrijebljen je uglati planinski pijesak veličine zrna između 0,5 mm i 2 mm. Miješanje je trajalo približno 15 minuta u mješalici s visokim smicanjem, počevši sa zasićenim suhim agregatom u kombinaciji s silicijskom prašinom, nakon čega je slijedilo dodavanje pijeska i udjela vode od 15%. Zatim je dodano preostalih 85% udjela vode, zajedno s cjelokupnom količinom plastifikatora, cementa, letećeg pepela i čeličnih vlakana.

Čvrstoća betona dobivena iz cilindričnih uzoraka reprezentativna je za neovijeni beton za standardni dizajn armiranog betona. Debljina ovijenog betona između spregnutih ploča bila je 46 mm. S obzirom na ovu debljinu i stanje ovijenosti između čeličnih ploča, tlačna čvrstoća betona nakon 28 dana, koja je izmjerena na 122 MPa na temelju uzoraka kocke debljine 100 mm prikazanih na slici 2, može se primijeniti za definiranje tlačne čvrstoće za ovaj specifični dizajn spregnutih ploča. Međutim, autor je odlučio primijeniti čvrstoću spregnutog materijala postignutu nakon 14 dana, koja je iznosila 102 MPa, za procjenu otpornosti spregnute ploče na savijanje. Ta je odluka donesena kako bi se izbjeglo precjenjivanje mehaničke otpornosti na savijanje izostavljanjem bilo kakvih korisnih doprinosa koji proizlaze iz samog dizajna spregnute ploče, što je rezultiralo konzervativnom procjenom za koju se očekuje da će biti niža od stvarne otpornosti uočene tijekom ispitivanja.

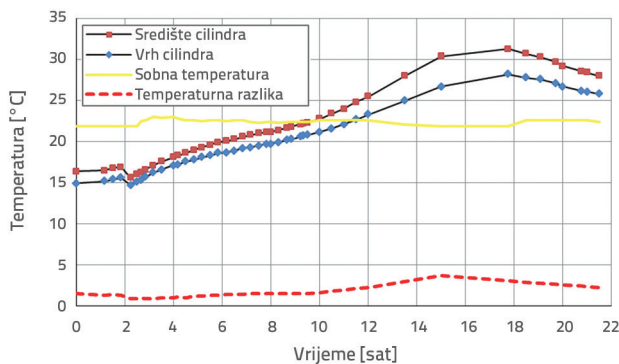


Slika 4. a) Vrijednosti tlačne čvrstoće skupa valjkastih uzoraka dobivenih iz mješavine T5; b) Ispitivanje mješavine T5 pomoću lijevka koje pokazuje slijevanje od 4 cm

4. Mjerenje temperature hidratacije

Na slici 5. prikazane su temperature zabilježene na površini i u središtu cilindričnih uzoraka pomoću termometara za beton. U ovom su istraživanju uzorci ploča njegovani topline pod toplinski izoliranim oblogama. Prema literaturi, specifična toplina betona iznosi između $c = 750 \text{ J/kg}\cdot\text{K}^\circ$ i $1000 \text{ J/kg}\cdot\text{K}^\circ$ [20, 21]. S obzirom na niski omjer vode i cementa u mješavini te prisutnost čeličnih vlakana, za procjenu topline generirane u pločama odabrana je niža vrijednost. Projektirani beton imao je gustoću od $d = 2,503 \text{ kg/m}^3$. Ploča je sadržavala oko $0,115 \text{ m}^3$ betona mase od 288 kg , stoga se za svako povećanje temperature iznad temperature okoline toplinska energija koju proizvodi ploča može procijeniti pomoću izraza (1):

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T = 288 \cdot 750 \cdot 1 = 216,00 \text{ J} \quad (1)$$



Slika 5. Evolucija topline dobivene hidratacijom cementa i izmjerene temperature

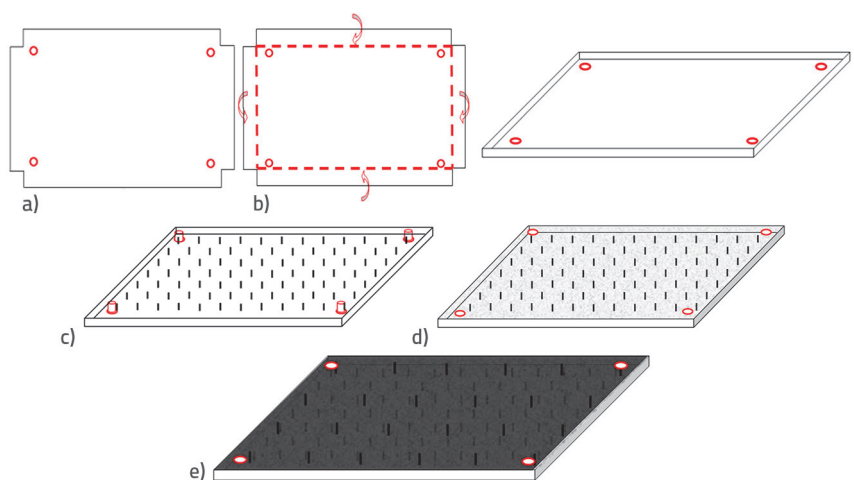
Samodostatnost topline razvijene procesom hidratacije za njegu betona cilj je ovoga dizajna, koji omogućuje proizvodnju spregnutih ploča bez ikakve dodatne njege, što je korisno u udaljenim područjima. Količina toplinske energije koju proizvodi svaka ploča jest značajna. Ako se toplina razvijena procesom hidratacije može zadržati odgovarajućom izolacijom, izrada ploče može započeti bez potrebe za dodatnom njegom, što je posebna prednost u uvjetima gdje idealni tvornički uvjeti njege nisu dostupni [16]. Svaka je ploča u potpunosti omotana u deblje prozirne plastične folije i ostavljena 36 sati prije podizanja i skladištenja do početka ispitivanja. Tlačna čvrstoća projektiranog betona nakon 36 sati, prema ispitivanju valjkastog uzorka, iznosila je 20 MPa , što je osiguralo dovoljnu čvrstoću ploče na savijanje i smicanje od vlastite težine tijekom transporta te sprječavanje odvajanja ploča od jezgrenog betona spregnutih ploča.

5. Konceptualizacija projektiranja spregnutih ploča

Predgotovljene spregnute ploče projektirane su za odupiranje raznim eksplozijskim opasnostima, uključujući ručne granate, improvizirane eksplozivne naprave (engl. *improvised explosive devices* - IED), površinske detonacije od 1 kg C4 i moguće napade skrivenim, većim količinama eksploziva, poput TNT-a ili $C4$, koji se ne mogu lako ručno postaviti, ali moguće ih je transportirati do cilja unutar 5 metara pomoću vozila ili drugih sredstava. Predložene spregnute ploče otporne na eksploziju stoga su prikladne i za vojnu i za civilnu primjenu. Za očekivane eksplozivne uvjete na udaljenosti od 5 metara u proračunu je uzeto 10 kg C4 , što je rezultiralo vršnim tlakom od 150 kN/m^2 [17].

Kako bi se omogućila brza izgradnja, ploče su dizajnirane da iskoriste toplinu razvijenu procesom hidratacije, omogućujući brzo postizanje početne čvrstoće. Početni koncept uključivao je izradu spregnutih ploča debljine 50 mm , sastavljenih od čeličnih ploča debljine 2 mm i betonske jezgre od 46 mm . Svaka ploča projektirana je da izdrži statički tlak od 50 kN/m^2 , što je zahtijevalo upotrebu tri spregnute ploče u nizu kako bi izdržale vršni tlak od 150 kN/m^2 . Čelične ploče, opremljene zavarenim moždanicima, služile su u dvije svrhe: kao oplata tijekom ulijevanja betona i kao vanjska čelična armatura za otpornost na savijanje, vlačne sile i zadržavanje slomljenog betona, čime se povećava apsorpcija energije eksplozije. Čelične ploče bile su mehanički povezane s betonskom jezgrom pomoću posmičnih moždanika i djelovale su kao vanjska armatura za beton do sloma. Glavni cilj bio je dokazati da vanjska mehanička veza između ploča i betonske jezgre može oponašati ponašanje betonske ploče armirane iznutra. U tu su svrhu strateški odabrani posmični moždanici i razmaknuti su kako bi se održao potreban posmični tok između čeličnih ploča i betonske jezgre.

Slike 6.a i 6.b ilustriraju pripremu donje ploče koja služi kao oplata za beton postavljen preko nje i kao vlačna i tlačna



Slika 6. Skica slijeda proizvodnje za montažne spregnute ploče: a) i b) Savijanje posebno oblikovane čelične ploče debljine 2 mm ; c) ploča sa zavarenim posmičnim moždanicima i rupicama na uglovima, izbušenim za pričvršćivanje, okružena cilindričnim cijevima; d) ugradnja betona; e) postavljanje gornje ploče sa zavarenim posmičnim moždanicima

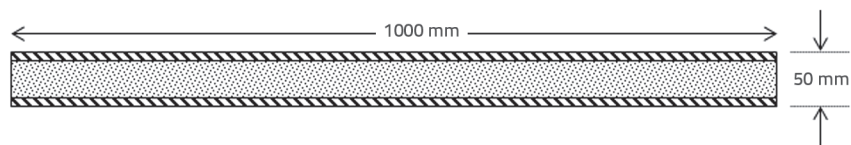
armatura za spregnuti presjek. Označeni krugovi predstavljaju unaprijed izbušene rupe namijenjene za pričvršćivanje spregnutih ploča na nosive okvire, o čemu će se više raspravljati u sljedećim odjeljcima. Slika 6.c prikazuje zavarene posmične moždanike promjera 6 mm i duljine 30 mm, osno raspoređene

na razmaku od 25 cm duž ploče širine 100 cm. Ovi moždanici postavljeni su 12,5 cm od rubova čeličnih ploča. Moždanici na gornjoj ploči pomaknuti su za 12,5 cm od onih na donjoj ploči kako bi se izbjeglo međudjelovanje. Moždanici su zavareni na ploče, a rupe za vijke izbušene su, kao što je prikazano na slici 6a, prije prelaska na konfiguraciju prikazanu na slici 6c. Beton je postavljen kao što je prikazano na slici 6d, a gornja ploča, sa zavarenim moždanicima i rupama za pričvršćivanje, postavljena je preko betona, kao što je prikazano na slici 6e. Posmični moždanici s gornje i donje ploče prodrli su u svježi beton, a spregnuta ploča zatim je prekrivena i ostavljena da očvršćava 36 h. Uz prikladnu zaštitu, beton je uspio dovoljno očvrstnuti pomoću vlastite topline hidracije i zadržanu vlagu, što je omogućilo podizanje i skladištenje spregnutih ploča debljine 50 mm.

Nakon utvrđivanja koncepcije pristupilo se procjeni otpornosti na savijanje projektirane ploče i određivanju zahtjeva za posmične moždanike.

6. Procjena proračunskog momenta savijanja i proračunskog posmika između betonske jezgre i čeličnih ploča

Kao što je navedeno u prethodnom odjeljku, svaka spregnuta ploča isprva je projektirana da izdrži pritisak eksplozije od 50 kN/m², s tim da se sav višak kapaciteta mora potvrditi ispitivanjima na savijanje. Slika 7. ilustrira poprečni presjek spregnute ploče bez prikaza omjera veličina. Betonska jezgra debljine 46 mm bila je omeđena dvjema čeličnim pločama, svakom debljine približno 2 mm ± 0,5 mm. Zavareni posmični moždanici promjera 6 mm pričvršćeni su na čelične ploče (nije prikazano na slici).



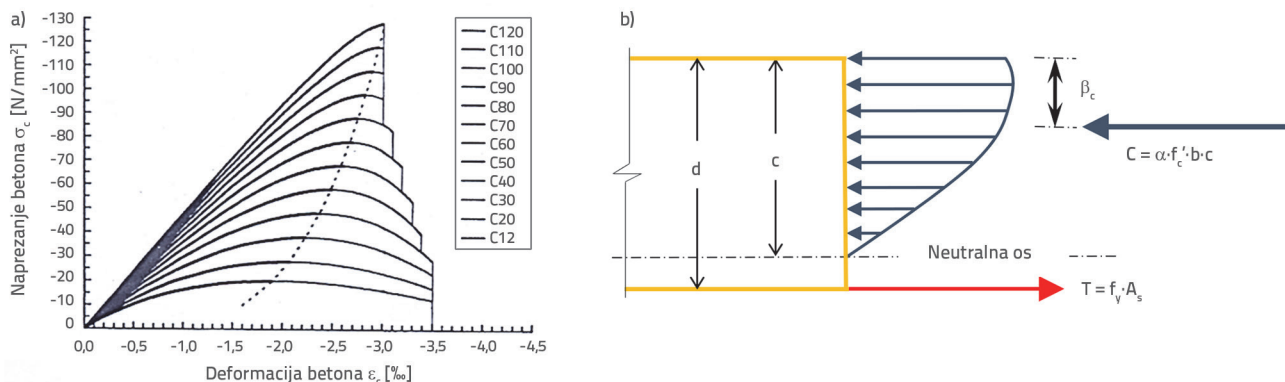
Slika 7. Skica širine spregnute ploče, koja prikazuje dvije čelične ploče i betonsku jezgru (bez prikaza mjerila, moždanici nisu prikazani)

Ovi moždanici, s kutnim zavarom debljine 4 mm i posmičnom čvrstoćom zavara od $f_w = 250$ MPa, prodiru 30 mm u betonsku jezgru. Moždanici su postavljeni u pravilnim osnim razmacima duž duljine i širine čeličnih ploča kako bi se osigurao učinkovit prijenos posmika.

Prije stvarnih ispitivanja opterećenja eksplozijom ploče su bile projektirane da izdrže vršni tlak od $p_s = 150$ kN/m². Izraz (2) daje najveći moment savijanja stvoren ovim tlakom duž slobodno oslonjenog niza ploča koje se oslanjaju na rubne grede širine 150 mm sa svijetlim rasponom od 2,2 m između nosivih greda. Ovaj se izračun temeljio na primjeni triju spregnutih ploča, od kojih je svaka projektirana da prenosi 1/3 vršnog tlaka od 150 kN/m² i 1/3 momenta danog u izrazu (2):

$$M = (150 \cdot 1 \cdot 2,2^2)/8 = 91 \text{ kN.m} \quad (2)$$

Mehanički dizajn spregnute ploče odstupa od konvencionalnog pristupa armiranom betonu. U ovom slučaju spregnuta ploča djeluje kao betonska konstrukcija ojačana izvana. Čelična ploča na tlačnoj strani mehanički je povezana s betonom, no može doći do izvijanja kada savojna čvrstoća ploče dosegne svoju granicu. Stoga se teorijski kapacitet ploče konzervativno procjenjuje isključivanjem doprinosa čelične ploče na tlačnoj strani te ograničavanjem čvrstoće čelične ploče na vlačnoj strani na njezinu granicu tečenja, $f_v = 355$ MPa. Na slici 8a prikazan je odnos između prosječnih tlačnih napreznja i različitih deformacija u valjkastim betonskim uzorcima [23]. Za betone do klase C50 približno 50 % proračunske čvrstoće nalazi se unutar granica linearnog i elastičnog ponašanja. Suprotno tome, beton klase C100 pokazuje gotovo linearno ponašanje do oko 80 % tlačne čvrstoće, što ga čini prikladnim za primjenu pri



Slika 8. a) Krivulje napreznje – deformacija za različite klase čvrstoće betona [23]; b) skica raspodjele tlačnih napreznja u betonu i vlačnih napreznja u čeliku u poprečnom presjeku

visokim naprezanjima. Slika 8.b prikazuje raspodjelu naprezanja u poprečnom presjeku spregnute ploče, gdje su "b" širina spregnute ploče, "c" je visina tlačne zone, a "d" udaljenost od vrha spregnute ploče do težišta čelične ploče na vlačnoj strani. Ovaj prikaz ne uključuje doprinos čelične ploče na tlačnoj strani. Prosječno tlačno naprezanje u tlačnoj zoni betona i položaj rezultante tlačne sile opisani su koeficijentima α odnosno β [24]. Za beton klase C100 primijenjene su vrijednosti $\alpha = 0,56$ i $\beta = 0,325$, koje karakteriziraju raspodjelu naprezanja unutar tlačne zone [24].

Izraz (3) prikazuje omjer čelika u vlačnoj zoni spregnute ploče. Primjenom izraza (4), nazivna savojna čvrstoća spregnute ploče procijenjena je kao $M_n = 32$ kN.m, što je prikazano u izrazu (5). Na temelju jasno definirane duljine raspona od $L = 2,2$ m izraza (6) određuje ekvivalentni raspodijeljeni tlak na ploči, koji generira najveći moment savijanja od $w_n = 53$ kN/m².

$$\rho = \frac{A_s}{b \cdot d} = \frac{20}{100 \cdot 4,7} = 0,0425 \quad (3)$$

$$M_n = \rho \cdot f_y \cdot b \cdot d^2 \cdot \left(1 - \frac{\beta \cdot f_y \cdot \rho}{\alpha \cdot f_c}\right) \quad (4)$$

$$M_n = 0,0425 \cdot 35500 \cdot 100 \cdot 4,7^2 \left(1 - \frac{0,325 \cdot 35500 \cdot 0,0425}{0,56 \cdot 10200}\right) = 32 \text{ kNm} \quad (5)$$

$$w_n = \frac{8 \cdot M_n}{L^2} \rightarrow w_n = 53 \text{ kN/m}^2 \quad (6)$$

Najveća posmična sila koja djeluje na ploču, V_{maks} , pod djelovanjem w_n izračunava se prema izrazu (7), gdje je "b" širina ploče i iznosi $b = 1$ m, a svijetli raspon iznosi $L = 2,2$ m.

$$V_{max} = \frac{w_n \cdot b \cdot L}{2} = \frac{53 \cdot 1 \cdot 2,2}{2} = 58 \text{ kN} \quad (7)$$

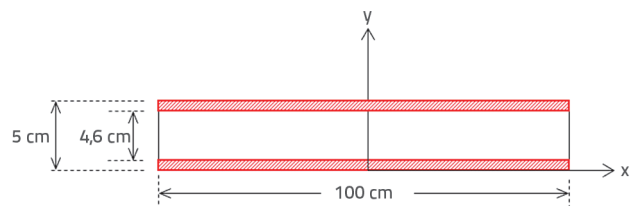
Konzervativno procijenjena nominalna čvrstoća na savijanje spregnute ploče te pripadajući raspodijeljeni tlak nisu uzimali u obzir utjecaj tlačne čelične ploče niti omeđenu tlačnu čvrstoću betona. Doprinos tlačne čelične ploče izostavljen je jer je stvarno ponašanje spregnute ploče pri savijanju bilo nepoznato prije provođenja statičkih ispitivanja. Iako se smatralo da je čelična ploča pod tlakom dovoljno povezana s betonom, nije poznato njezino točno ponašanje pod stvarnim uvjetima opterećenja, stoga je svaki višak savojnog kapaciteta, koji bi mogao postojati iznad nazivnog kapaciteta navedenog u izrazu (9), isključen iz analize. Stvarni kapacitet savijanja utvrđen je statičkim ispitivanjem savijanja.

7. Proračun za prijenos posmičnih sila između betonske jezgre i čeličnih ploča

Projektiranje moždanika predstavlja ključni aspekt predloženih spregnutih konstrukcija. Moždanici ne samo da mehanički povezuju čelične ploče s betonskom jezgrom, osiguravajući

prijenos posmičnih naprezanja kako bi se ostvarila vlačna čvrstoća čeličnih ploča, već također pružaju poprečno ukrčenje. Ovo ukrčenje sprječava izvijanje čelične ploče pod tlakom pri izvijanju sve do njezina sloma uslijed savijanja. Čelične ploče prisutne su i ostaju u kontaktu s betonom u svim fazama otpornosti spregnute ploče.

Moždanici zavareni na ploče olakšavaju prijenos naprezanja tijekom savijanja. Kako bi se utvrdila veličina posmičnog naprezanja koje se prenosi na betonsku jezgru kompozitne ploče, analizirana su svojstva poprečnog presjeka. Na slici 9 prikazan je poprečni presjek ploča širine od 100 cm, s betonom debljine 4,6 cm i čeličnim pločama debljine 2 mm. Modul elastičnosti čelika iznosi $E_s = 210\,000$ MPa, a modul elastičnosti betona klase C100 iznosi $E_c = 43\,895$ MPa, s omjerom $\eta = E_s/E_c = 4,78$ [23]. Izrazi (8) i (9) prikazuju moment inercije spregnute ploče i statički moment jedne čelične ploče u odnosu na težište presjeka, koje se u ovom slučaju podudara s njegovim geometrijskim središtem.



Slika 9. Poprečni presjek spregnute ploče (bez mjerila, moždanici nisu prikazani)

$$I_{composite} = \frac{4,6^3 \cdot 100}{12} + 2 \cdot \frac{0,2^3 \cdot 100 \cdot 4,78}{12} + 2 \cdot 0,2 \cdot 4,78 \cdot 2,4^2 = 1,913 \text{ cm}^4 \quad (8)$$

$$Q = 0,2 \cdot 100 \cdot 4,78 \cdot 2,4 = 229 \text{ cm}^3 \quad (9)$$

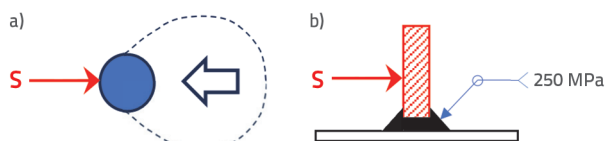
Spregnute ploče projektirane su za raspodijeljeni tlak od 50 kN/m² duž svijetlog raspona od 2,2 m. Najveći posmik javlja se u blizini oslonaca i linearno se smanjuje na nulu prema sredini raspona pod raspodijeljenim silama. Najveće posmično naprezanje koje se mora prenijeti između čeličnih ploča i betonske jezgre određeno je izrazom (10), gdje je "V" posmična sila procijenjena na $V = 58$ kN prema izrazu (7), a "t" širina područja smicanja.

$$\tau = \frac{V \cdot Q}{I \cdot t} = \frac{58 \cdot 229}{1913 \cdot 100} = 0,069 \text{ kN/cm}^2 = 0,69 \text{ MPa} \quad (10)$$

Na širini od 100 cm zavarena su četiri moždanika na osnim razmacima od 25 cm. Redovi moždanika raspoređeni su uzduž čeličnih ploča također u razmacima od 25 cm, što svakom moždaniku daje pripadajuću ploštinu od $A_t = 25 \text{ cm} \cdot 25 \text{ cm} = 625 \text{ cm}^2$. Na temelju prenesenog posmičnog naprezanja iz izraza (10) i izraza A_t , izraz (11) daje posmičnu silu "S" koju svaki moždanik mora prenijeti.

$$S = \tau \cdot A_t = 0,69 \cdot 625 \cdot 100 = 43\,125 \text{ N} \quad (11)$$

Moždanici prenose posmičnu silu na betonsku jezgru. Moždanici su napravljeni od čeličnih šipki za armiranje razreda S420, s granicom razvlačenja od $f_g = 420$ MPa i promjerom $D = 6$ mm, odrezani tako da omjer duljine i promjera moždanika iznosi $L/D = 5,83$. Deformacija moždanika uslijed savijanja smatra se zanemarivom. Na slici 10.a prikazan je shematski prikaz moždanika pod utjecajem posmične sile (S) koja djeluje na njegovu lijevu stranu, a kojoj se odupire tlačni "mjehur" formiran s njegove desne strane. Moždanik je zavaren za čeličnu ploču duž cijelog opsega i na donjoj strani, kao što je prikazano na slici 10.b. Vlačna čvrstoća zavara iznosila je $f_E = 420$ MPa, dok je posmična čvrstoća bila $f_s = 0,7 f_E = 294$ MPa, a duljina zavara iznosila je 4 mm.



Slika 10. a) Tlocrt moždanika pod djelovanjem posmične sile (S); b) uzdužni presjek moždanika zavarenog na čeličnu ploču

Nosiva ploština moždanika u betonskoj jezgri procijenjena je na $A_b = 2 \times D \times L = 360$ mm², uzimajući u obzir stvaranje "mjehura" naprezanja iza moždanika. Sukladno tome, svaki moždanik koji prenosi posmičnu silu proizvodi tlak " f_b " u betonu prema izrazu (12), koja je manja od nazivne tlačne čvrstoće betona na temelju njegove čvrstoće kocke $f_{kocka} = 122$ MPa.

$$f_b = (S/A_b) = (43,125/360) = 120 \text{ MPa} < 122 \text{ MPa} \quad (12)$$

Za prijenos posmične sile s ploče na moždanik i betonsku jezgru potrebno je zavarivanje moždanika za čeličnu ploču. Za duljinu zavara od 4 mm ploština zavara iznosila je $A_w = 154$ mm², a posmično naprezanje na zavaru izračunato je prema izrazu (13), koje je niže od posmične čvrstoće.

$$F_w = (S/A_w) = (43,125/153) = 281 \text{ MPa} < 294 \text{ MPa} \quad (13)$$

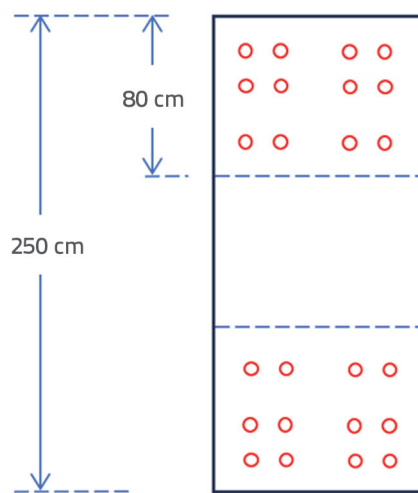
Idejni projekt predgotovljenih spregnutih ploča temeljio se na parametrima čvrstoće primijenjenih materijala i razmatranjima mehaničkog ponašanja ploča uslijed savijanja. Sljedeća faza uključivala je proizvodnju ovih uzoraka i provedbu ispitivanja na statičko i opterećenje eksplozijom. Tijekom faze proizvodnje određene su izmjene primijenjene na spregnute ploče u vezi s prijenosom posmičnih sila. Upotreba moždanika promjera 6 mm i duljine 30 mm, iako jednostavna u teoriji, pokazala se izazovnom za ručnu izradu u radionici.

Prema projektu, svaka je ploča zahtijevala 40 moždanika, što znači da je svaka spregnuta ploča s dvjema čeličnim pločama zahtijevala pojedinačno zavarivanje 80 moždanika. Osim ako zavarivanje nije automatizirano – pri čemu bi svaki moždanik, precizno izrezan prema dimenzijama, služio kao elektroda (što nije bio slučaj) – ručno zavarivanje kratkih moždanika

pokazalo se izazovnim za tehničare i radnike u radionici. Ručno zavarivanje također nije moglo osigurati dosljednu kvalitetu spojeva moždanika.

Zbog vremenskih ograničenja za pripremu uzoraka za ispitivanja eksplozije na vojnim poligonima dizajn je revidiran kako bi se uveo sustav spajanja spregnutih ploča pomoću vijaka. U ovom ažuriranom projektu većina moždanika zamijenjena je cijevima visine 46 mm, vanjskog promjera 24 mm i unutarnjeg promjera 20 mm. Ove su cijevi točkasto zavarene na čelične ploče s prethodno izbušenim rupama promjera 20 mm, omogućujući učvršćivanje ploča vijcima tijekom ispitivanja.

U početku su ispitivanja udarnim valom provedena na trima spregnutim pločama ukupne debljine 15 cm. Nakon ove izmjene, ispitivanja su nastavljena na dvjema pločama ukupne debljine 10 cm. Očekivalo se da će mehanička svojstva i performanse revidiranih vijčanih ploča premašiti procjene izvorno predviđene proračunom, stoga je odlučeno ukloniti moždanike na duljini od 90 cm na gornjem i donjem dijelu ploča te ih zamijeniti cjevastim nastavcima zavarivanim oko prethodno izbušenih rupa na čeličnim pločama. Ovi nastavci osigurali su prostor za postavljanje vijaka koji su osiguravali dvije spregnute ploče tijekom ispitivanja udarnim valom. Slika 11. prikazuje skicu čeličnih ploča s prikazanim izmjenama uvedenim za proizvodnju. Autor je, međutim, inzistirao na ugradnji osam moždanika, svakog promjera 6 mm i duljine 30 mm, u srednjem dijelu ploča na duljini od 70 cm, kako bi se procijenila njihova učinkovitost tijekom ispitivanja statičkim i eksplozivnim opterećenjima. Dva reda moždanika zavarena su na osnom razmaku od 20 cm širine od 100 cm, s razmakom od 50 cm između dvaju redova.



Slika 11. Tlocrtna skica izmijenjene čelične ploče za proizvodnju i ispitivanje

8. Proizvodnja predgotovljenih spregnutih ploča

Slika 12. prikazuje postupak izrade spregnutih ploča. Nakon postavljanja prve čelične ploče, čiji su rubovi savijeni kako bi oblikovali oplatu za beton, u kalup se ulijevao visokoplastični



Slika 12. Slijed proizvodnje ploča, nakon kojeg slijedi ručno prevoženje ploča: a) ugradnja betona; b) rasprostiranje betona; c) ručni transport gotove spregnute betonske ploče



Slika 13. Slijed proizvodnje ploče: a) ugradnja betona; b) rasprostiranje betona; c) završna obrada

beton koji je razvučen zidarskom žlicom. Beton je ravnomjerno raspodijeljen preko čelične ploče koja je služila kao oplata. Beton je imao dovoljno plastičnosti da zadrži svoj oblik i olakša njegovo polaganje. Potom je gornja čelična ploča postavljena iznad betona, stvarajući sendvič-strukturu, gdje je visokoučinkoviti beton bio smješten između dviju čeličnih ploča s moždanicima. Cijeli proces ugradnje betona i zatvaranja spregnute ploče, koja je težila približno 360 kg, trajao je oko 30 minuta uz pomoć pet radnika.

Cjevasti pričvršni elementi prikazani na slici 12. zavareni su oko oboda kružnih rupa izrezanih u pločama kako bi se osigurao prostor za vijke za pričvršćivanje na više ploča. Slika 13. prikazuje drugu sekvencu proizvodnje u hladnom okruženju, gdje je temperatura okoline bila između 10 °C i 15 °C. Kondenzacijske pare nastale uslijed topline koju stvara betonska masa prikazane su na slici 13.a. Konzistencija betona omogućuje dovoljnu plastičnost za ručnu ugradnju i zadržavanje oblika, što olakšava polaganje betona.

9. Rezultati statičkog ispitivanja spregnute ploče savijanjem

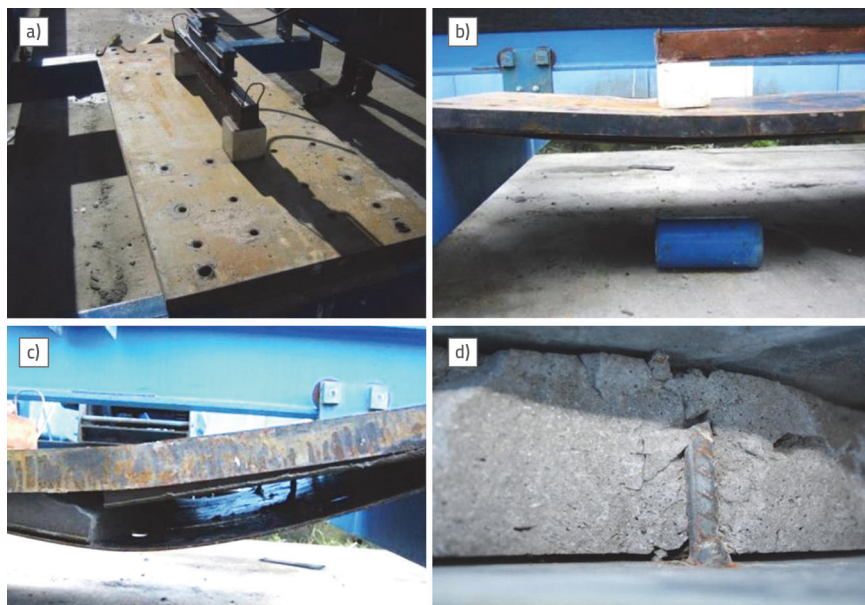
Slika 14. prikazuje trenutke tijekom ispitivanja statičkim opterećenjem u četirima točkama provedenog na jednoj ploči duljine 250 cm koja se oslanja na čelične sandučaste grede okvira za ispitivanje sa širinom nosača od 15 cm. Ispitivanje

je kontrolirano silom, s pločama koje su bile opterećivane hidrauličkom prešom sve dok nije dosegnuta otpornost na savijanje. Zavareni valjkasti pričvršni elementi omogućili su prijenos posmičnih sila između betonske jezgre panela i čeličnih ploča. Slobodno oslonjena ploča svijetlog raspona $L = 2,2$ m postupno je opterećena u točkama na $L/4$ i $3L/4$ raspona. Pojedinačno koncentrirano opterećenje $2P$ primijenjeno hidrauličkom prešom na sredini raspona podijeljeno je u dvije jednake sile pomoću greda poduprtih u $L/4$ i $3L/4$ duž ploče. Ploča je dosegla čvrstoću na savijanje pri približno $2P = 200$ kN, nakon čega se gornja tlačna ploča izvijala, nakon čega je uslijedio tlačni slom betonske jezgre, vlačno raspucavanje i odvajanje donje ploče zbog vlakna. Koncentrirane sile P u $L/4$ i $3L/4$ iznosile su po 100 kN i proizvele su moment savijanja prikazan u izrazu (14) na rasponu ploče između $L/4$ i $3L/4$.

$$M = (P \cdot L/4) = (100 \cdot 2,2/4) = 55 \text{ kNm} \quad (14)$$

Ispitana savojna čvrstoća kompozitne ploče $M = 55$ kNm bila je značajno veća od njezine konzervativno procijenjene nazivne savojne čvrstoće $M_n = 32$ kNm, koja je dana u izrazu (5). Raspodijeljeni tlak na izloženu površinu kompozitne ploče, koji proizvodi maksimalni moment savijanja $M = 55$ kNm, prikazan je u izrazu (15).

$$w_n = (8 \cdot M_n/L^2) \rightarrow w_n = 91 \text{ kN/m}^2 \quad (15)$$



Slika 14. Statičko ispitivanje na savijanje spregnute ploče u četirima točkama: a) početna faza opterećenja; b) lokalno izvijanje gornje spregnute ploče; c) odvajanje od tlačne ploče, drobljenje vrha betonske jezgre, nakon čega slijedi njezino otkazivanje zbog prevelikog savijanja; d) betonska jezgra naliježe na posmični klin zavaren na vlačnu ploču

Granično savijanje ploče dosegnuto je lokalnim izvijanjem gornje ploče i slomom betonske jezgre pod tlakom. Ploča je bila opterećena do sloma u intervalima sila od približno 10 kN, brzinom od približno 10 s po intervalu. Naknadna prekomjerna deformacija uzrokovala je lom preostale betonske jezgre uslijed djelovanja vlaka. Preostala veza donje ploče s betonom pomoću moždanika održala je cjelovitost ploče, a unatoč slomu pri savijanju, ploče su ostale povezane, s pojedinačnim komadima betona između njih. Slika 14.c prikazuje ploču opterećenu iznad točke loma i prikazuje potpuni slom betonske jezgre. Slika 14.d prikazuje moždanike u betonu i rezultirajući slom betona. Ispitivanje na savijanje, koje je provedeno kao dokaz koncepta, pokazalo je da su ploče povezane s betonskom jezgrom preko moždanika djelovale kao vlačno ojačanje za inače krhki beton kada su one potpuno savijene. Iako spregnuta ploča više nije mogla izdržati savijanje, ostala je povezana između čeličnih ploča i još je uvijek bila sposobna odupirati se slomu i apsorbirati energiju eksplozivnog napada.

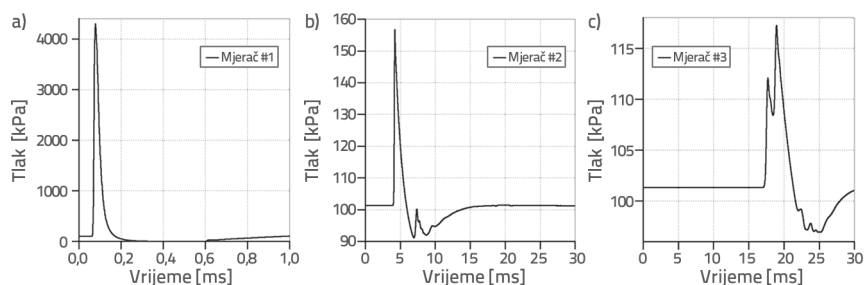
Nakon statičkog ispitivanja utvrđeno je da će dvije ploče ukupne čvrstoće na savijanje od 55 kNm svaka pružiti zajednički kapacitet savijanja od 110 kNm, što premašuje projektirani moment savijanja od 91 kNm, dan u izrazu (2). Očekuje se da će kombinirano djelovanje dviju kompozitnih ploča spojenih vijcima dodatno povećati njihov zajednički kapacitet na savijanju iznad 91 kNm. Međutim, zbog jasnoće i izbjegavanja neodrživih pretpostavki, rezultirajuće ponašanje dviju pojedinačnih ploča spojenih vijcima nije uzeto u obzir.

9. Ispitivanja predgotovljenih spregnutih ploča uslijed eksplozije

U drugoj fazi ispitivanja, provedenoj kao dokaz koncepta za DeMIR, koji se primjenjuje u konstrukciji kompozitnih panela, dva seta kompozitnih panela, od kojih se svaki sastoji od dviju ploča, prevezeni su na vojni poligon i pričvršćeni zajedno. Svaki set ploča bio je pričvršćen s oba kraja na trokutasti okvir izrađen od kutijastih čeličnih profila. Jedan set panela odabran je za ispitivanje eksplozijom, dok je drugi set prepušten vojsci. Ispitni set bio je podvrgnut četirima detonacijama eksploziva C4 na udaljenostima od 775, 275, 25 i 0 cm od površine ispitnih ploča do površine eksploziva. Testiranje je počelo u 9:10 sati i trajalo do 13:30. Prema sigurnosnim protokolima, udaljenost od 1 kilometra od mjesta miniranja morala se održavati prije i

nakon završetka ispitivanja miniranja. Temperature okoline tijekom ispitivanja bile su između 10 °C i 15 °C. Trajanje tlakova proizvedenih eksplozijama mjeri se u milisekundama, stoga je ponašanje ploče bilo izrazito različito od onog opaženog tijekom statičkih ispitivanja na savijanje prikazanih na slici 13. Dijagrami tlaka prikazani na slici 14 odgovaraju eksplozijama koje su se dogodile na $d = 25, 275$ i 775 cm od površine panela. Ovi se dijagrami temelje na zaštićenom numeričkom softveru koji su razvili vojni inženjeri primjenom stvarnih podataka ispitivanja tlaka eksplozije. Vršni tlakovi eksplozije trajali su od 0,1 do 0,3 milisekunde, ovisno o udaljenosti detonacije. U tablici 1. prikazani su procijenjeni i ekstrapolirani vršni tlakovi na udaljenosti od $d = 0$ m, koji se ne mogu numerički izračunati programom zbog matematičke singularnosti na $d = 0$ m.

Profili tlaka prikazani na slici 15. pokazuju atmosferski tlak na razini površine mora, koji iznosi 101,3 kPa. Ovi profili prikazuju razvoj vršnog pozitivnog tlaka, nakon čega slijedi



Slika 15. Numeričke procjene tlaka eksplozije na udaljenostima: a) $d = 25$ cm; b) $d = 275$ cm; c) $d = 775$ cm od površine spregnute ploče, na temelju vlastitog softvera

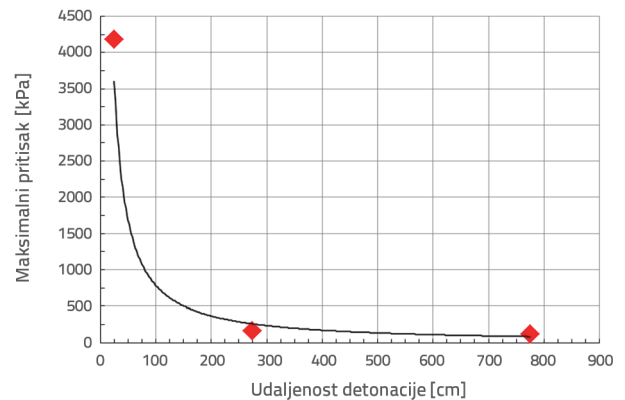
faza negativnog tlaka u odnosu na referentni tlak od 0. Tablica 2. prikazuje procijenjene i ekstrapolirane vršne tlakove eksplozije, dok slika 16. prikazuje varijacije vršnih tlakova s udaljenošću.

Eksponencijalna krivulja koja predstavlja ovu promjenu dosegla je vrijednost R^2 od 0,95, što ukazuje na jaku korelaciju. Ova krivulja približava se beskonačnosti na $d = 0$ cm. Međutim, usprkos ovoj matematičkoj značajki, priznaje se da fizička vrijednost za tlak eksplozije postoji, iako je neizračunljiva pomoću numeričke procedure koju su predložili tvorci programa. Vojni dužnosnici predložili su da najveći tlak na $d = 0$ cm bude najmanje 10.000 kPa.

Tablica 2. Maksimalni procijenjeni pritisci na temelju vlastitog numeričkog softvera i predloženi najveći tlak pri $d = 0$

Udaljenost eksplozije (d) do površine ploče od ruba punjenja [cm]	Procijenjeni tlakovi (P) i predloženi tlak za $d = 0$ cm [kPa]
0	10,000*
25	4180
275	157
775	117

Prvo ispitivanje eksplozijom, provedeno na udaljenosti od 775 cm od prednje strane ploče, nije imalo vidljiv učinak na ploče; stoga slike iz ovog testa nisu uključene. Slika 17.a prikazuje rezultate drugog testa eksplozijom, gdje je kilogram eksploziva C4 postavljen 275 cm od prednje strane ispitne ploče. Slika 17.b prikazuje stanje prednje strane ploče nakon eksplozije. Eksplozija nije uzrokovala nikakva vidljiva oštećenja na licu ili bokovima ploče; umjesto toga, dovela je do opečenih površina. Slika 18.a prikazuje postavljanje iste količine C4, ovaj put na udaljenost od 25 cm od površine ispitne ploče. Slika 18.b prikazuje stanje lica ploče nakon eksplozije. Ponovno nije bilo vidljivih oštećenja na pločama, međutim, opečene površine bile su značajne. Slika 19.a prikazuje postavljanje eksploziva izravno na površinu ploče, što je bio posljednji test eksplozije, proveden s preostalim raspoloživim eksplozivom. Tijekom svih ispitivanja spregnute ploče bile su oslonjene na dvije kvadratne čelične grede širine od 150 mm.



Slika 16. Varijacija numeričkih procjena tlaka eksplozije s udaljenošću temeljeno na softveru

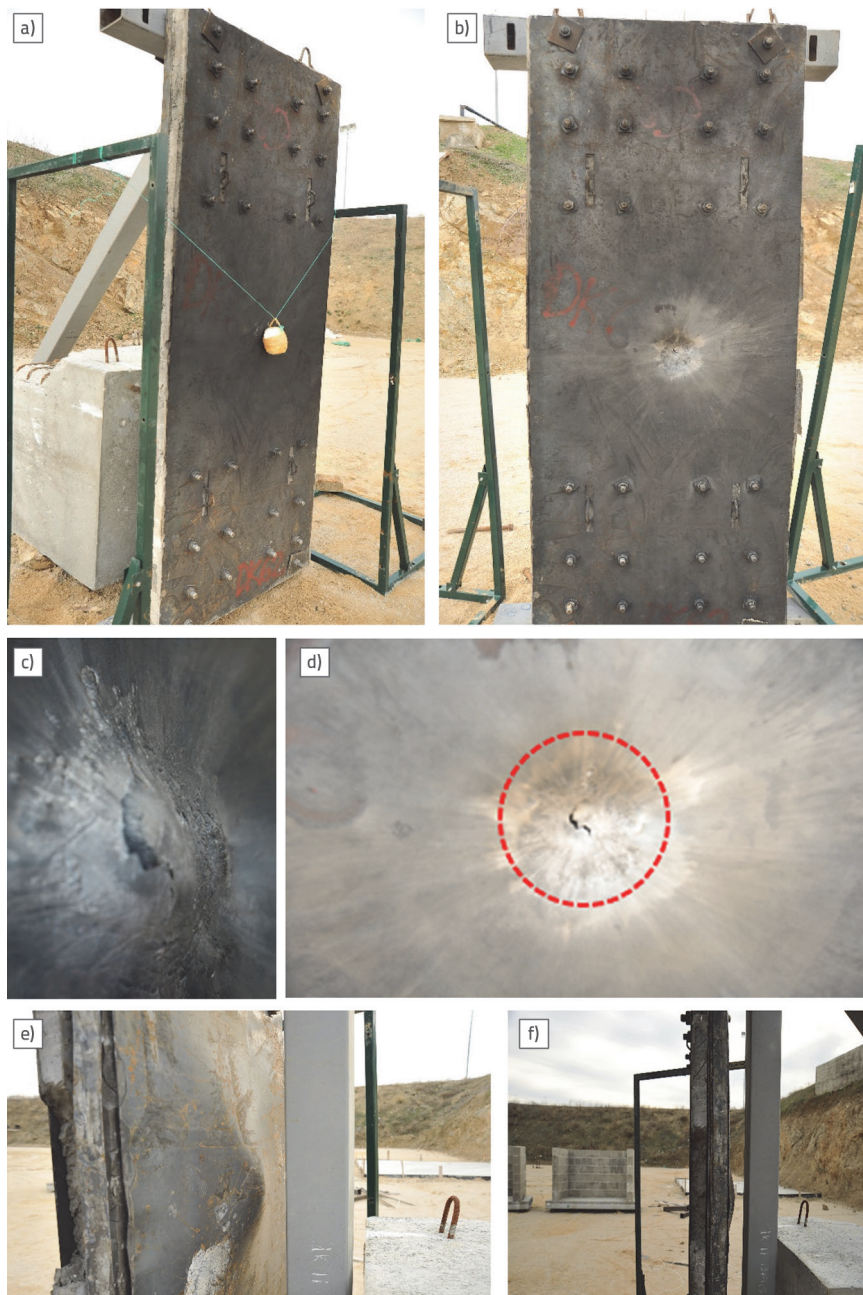
Četvrta eksplozija, na $d = 0$, rezultirala je vidljivim oštećenjem ploče. Slike 19.b – 19.f ilustriraju oštećenje ploče iz različitih kutova. Slike 19.b, 19.c i 19.d prikazuju krater nastao unutar čelične ploče, promjera približno 20 cm. Prva čelična ploča pokazala je deformaciju od oko 6 cm i dosegla je svoju granicu plastičnosti. Prva plastificirana čelična ploča formirala je djelomično sferičnu kupolu promjera 20 cm i visine 5 cm. Tlak eksplozije probio je i gornju kompozitnu ploču debljine 5 cm i drugu kompozitnu ploču iste debljine, kao što je prikazano



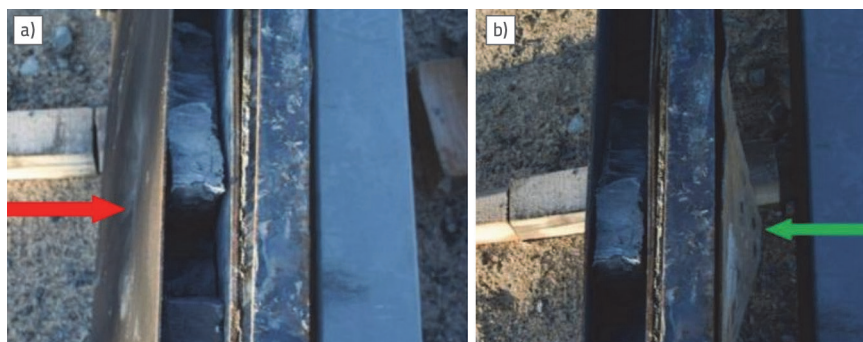
Slika 17. a) eksploziv C4 postavljen 275 cm od prednje strane ploča; b) lice ploče nakon eksplozije pokazuje manje opečenu površinu, ali nema vidljivih konstrukcijskih oštećenja



Slika 18. a) eksploziv C4 postavljen 25 cm od prednje strane ploča; b) lice ploče nakon eksplozije s vidljivim opečanim površinama, ali bez primjetnih konstrukcijskih oštećenja



Slika 19. a) eksploziv C4 postavljen 25 cm iznad lica ploča; b), c), d), e), f) stanje ploča nakon eksplozije, s prodorom kroz prvu ploču, ali bez prodora kroz drugu ploču



Slika 20. a) Smjer učinka eksplozije; b) dvije spregnute ploče pružaju otpor

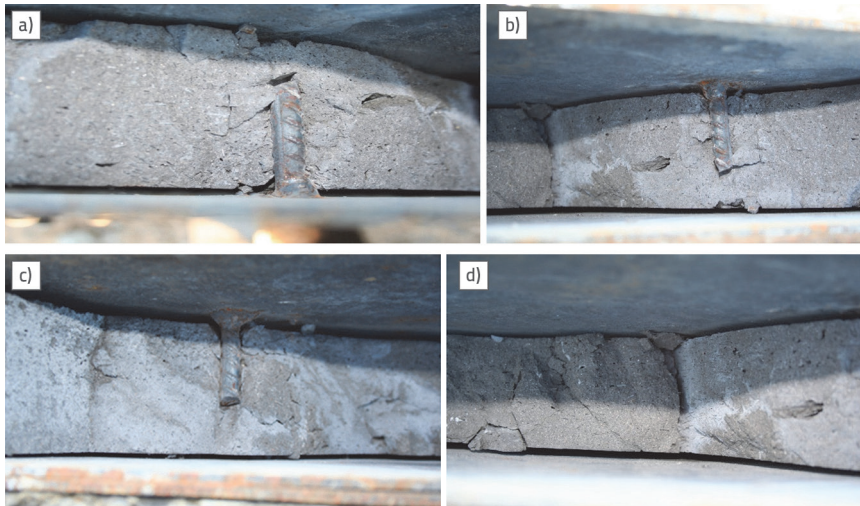
na slikama 19.e i 19.f. Međutim, tlak eksplozije nije probio stražnju ploču druge spregnute ploče.

Slike 20.a i 20.b pokazuju smjerove učinka udara i odgovarajuću otpornost na učinak udara. Slika 18.a prikazuje slomljenu betonsku jezgru kada je tlak eksplozije probio betonsku ploču. Unatoč oštećenjima, dvije spregnute ploče, ukupne debljine 10 cm, učinkovito su spriječile potpuni prodor tlaka eksplozije, čime je zid ostao netaknut. Preporučeni postupak nakon takvog napada jest uklanjanje oštećenih ploča s okvira i pričvršćivanje novih ploča na postojeći okvir.

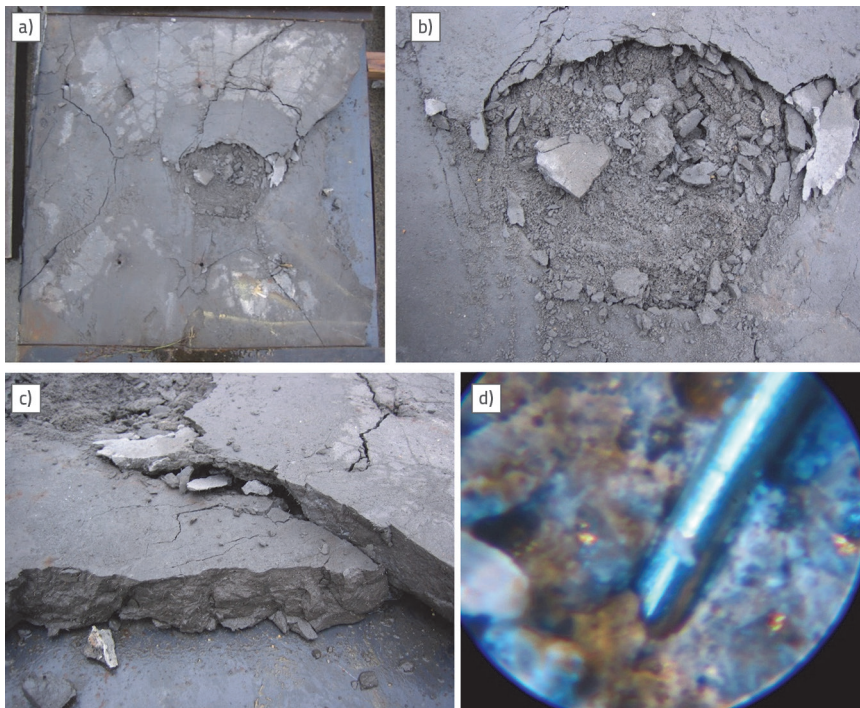
Slike 21.a do 21.d ilustriraju slomljeni betonski oslonac moždanika i tlačni slom betona promatran u područjima oslanjanja moždanika unutar središnjeg dijela spregnutih ploča. Prema opažanjima, učincima eksplozije prvenstveno se odupire apsorpcijom energije betonske jezgre uslijed loma, kao i plastificiranjem i kidanjem čeličnih ploča. Ploče su učinkovito omeđile betonski jezgru, omogućujući kontrolirano drobljenje betona kako bi apsorbirale energiju eksplozije. Na slici 21c prikazan je savijeni moždanik, dok se slomljeni beton pomaknuo u stranu, a moždanik na slici 21d probio je nosivi beton. Ove slike pokazuju da su moždanici djelovali učinkovito i da su zajedno s pločama omeđili beton. Unatoč lomu betona, ova je konfiguracija pružila da se iskoriste svojstva žilavosti raspadajućeg betona za apsorpciju energije.

Slika 22. prikazuje unutrašnjost središnjih 100 cm prve spregnute ploče, koja je bila izravno izložena eksploziji. Gornja čelična ploča uklonjena je radi daljnjeg ispitivanja. Zona praškastog betona smještena ispod prve probijene čelične ploče prikazana je na slikama 22.a i 22.b, promjera približno 30 cm. Radijalno širenje zona sloma mogu se uočiti izvan usitnjenog područja. Slika 22.c naglašava prisutnost čeličnih vlakana duž rubova pukotina betonskih komada, dok slika 22.d daje uvećani pogled na površinu betona, prikazujući ugrađena čelična vlakna.

Stražnje ploče i prve i druge spregnute ploče odvojene su od okvira radi



Slika 21. Unutrašnjost središnjeg dijela spregnute ploče koja prikazuje betonsku jezgru, naglašavajući oslonac na čeličnim moždanicima zavarenima na gornju i donju ploču u betonskoj jezgri i tlačno drobljenje betonskog oslonca moždanika



Slika 22. a) i b) Lom i raspršivanje unutar betona unutar prve spregnute ploče izravno izložene učinku eksplozije od 1 kg C4; c) slomljeni beton između dviju ploča; d) x100 krupni plan čeličnih vlakana ugrađenih u beton

ispitivanja. Međutim, zbog organizacijskog propusta autora, slike iz ovog istraživanja nažalost su izgubljene kao rezultat kvara digitalne datoteke i nedostatka sigurnosnih kopija. Primijećeno je da je druga čelična ploča na stražnjoj strani prve spregnute ploče također dosegla svoju granicu plastičnosti i pokazala pukotinu sličnu onoj prikazanoj na slikama 19.c i 19.d, iako kraće duljine od približno 30 mm. Promjer kratera i prve i druge čelične ploče druge spregnute ploče bio je oko 15 cm, s maksimalnom

dubinom od približno 4 cm. Unutar betonske jezgre druge spregnute ploče, promjer zone praškastog betona bio je oko 20 cm, sa sličnim, iako kraćim, zonama radijalnog loma. Druga čelična ploča druge spregnute ploče pokazala je plastifikaciju, kao što se vidi na slici 19.e, ali tlak eksplozije nije probio kroz nju. Kao rezultat toga, energija eksplozije uzrokovane kilogramom eksploziva C4 bila je učinkovito zadržana u dvjema spregnutim pločama debljine 5 cm, što je uzrokovalo lom betonske jezgre te plastifikaciju i pucanje čeličnih ploča. Otpor na savijanje koje ploče pružaju pritisku eksplozije nije promatran niti instrumentalno mjereno. Međutim, ako se otpor na savijanje i pojavio, to nije bio primarni način otpora zbog vrlo kratkog trajanja pritiska udara. Eksperimentalna postavka sastojala se od dviju spregnutih ploča izloženih četirima uzastopnim opterećenjima udarom u vremenskom razmaku od približno 40 minuta. Eksplozija primijenjena na prednju stranu kompozitnih ploča na $d = 0$ cm uzrokovala je vidljiva oštećenja, dokazujući da su se spregnute ploče ponašale prema očekivanjima pod tlakom eksplozije i učinkovito apsorbirale energiju unutar granica čeličnih ploča.

Čelična vlakna ugrađena u beton pokazala su se korisnima u uvjetima eksplozije. Ispitivanje slomljenih dijelova pokazalo je da su vlakna ostala ugrađena i da se nisu potpuno odvojila od betona. Iako relativna učinkovitost vlakana u usporedbi s betonom bez vlakana nije kvantificirana u ovom istraživanju, svojstva loma uočena u betonskim jezgrama kompozitnih ploča pokazuju da vlakna potiču kontrolirano i ograničeno propadanje betona.

10. Zaključak

Ovo istraživanje bilo je usmjereno na niz razvojnih aktivnosti i testova s ciljem procjene učinkovitosti predloženog načela oblikovanja DeMIR. Razvijanje konstrukcijske otpornosti na tlakove uslijed eksplozije uključuje razmatranje performansi u ograničenim uvjetima. Magnituda takvih opterećenja često premašuje elastične granice konstrukcija, a učinkovita otpornost obično zahtijeva preusmjeravanje ili disipaciju učinka udarnog vala. Projektiranje konstrukcija koje mogu izdržati eksplozivne

sile unutar elastičnih granica može biti skupo i predstavljati izazove. Konkretno, elastična otpornost na sile uslijed eksplozije predstavlja značajan problem za skloništa ili hangare, od kojih se očekuje da ostanu potpuno netaknuti i funkcionalni nakon napada eksplozijom. S druge strane, principi žrtvanog dizajna, primjenjivi na lagana i mobilna rješenja protiv eksplozijskih sila, mogu ponuditi fleksibilnost u izvedbi i upotrebljivosti.

Ovo je istraživanje pokrenuto kroz suradnju između privatnog sektora i vlade, uz financijsku potporu Turskog znanstvenog i tehnološkog istraživačkog vijeća (TUBITAK) putem programa TEYDEB 1501, čiji je cilj poticanje zajedničkih znanstvenih nastojanja između privatnog sektora, akademske zajednice, i vladinih tijela. Provedeno je 2010. godine, a autori su nastojali razviti lagana i mobilna rješenja za obrambene konstrukcije protiv eksplozivnih prijetnji. Privatni sektor uključivao je proizvođača predgotovljenog betona s kojim je autor surađivao na dizajnu i razvoju predgotovljenih betonskih elemenata. Vladina uključenost obuhvatila je vojne kopnene snage i vojni inženjerski korpus. Autor je predložio projekt TUBITAK, a nakon što su osigurana ograničena bespovratna sredstva, pokrenuto je istraživanje dokazivanja koncepta. Predloženi dizajn za otpornost na eksplozijske sile nudi nekoliko prednosti, uključujući laganu konstrukciju u odnosu na postojeće alternative i visok omjer čvrstoće i težine. Predgotovljena spregnuta ploča dovoljno je lagana za transport vojnim teretnim helikopterima i lakim kopnenim vozilima, što je čini održivom opcijom za zaštitu na granicama i ključnim vojnim postrojenjima. Osim toga, mogućnost proizvodnje ovih ploča na udaljenim lokacijama povećava njihovu praktičnost. Slijedom toga, sve strane uključene u projekt imale su jake poticaje za podršku ovom istraživanju.

Međutim, ovaj široki spektar angažmana bio je popraćen skupom pravila, propisa, ograničenja i rokova koji su se značajno razlikovali između vlade, akademije, privatnog sektora i vojske. Raspoloživo vrijeme ispitivanja i sadržaj eksploziva bili su ograničeni na pola dana, s 4 kg C4, dodijeljenim samo za četiri ispitivanja opterećenja eksplozijom. Zahtjevi autora za dodatnim vremenom i testovima bili su odbijeni. Vojni poligoni mogli su se iskoristiti samo za testiranje, a ne za ispitivanje uzoraka, stoga su jedine dostupne fotografije snimljene prije i nakon testova udarnim valom. Uzorci su zadržani na vojnom poligonu i kasnije prebačeni u prostorije privatnog sektora za daljnja istraživanja. Nažalost, neke fotografije druge spregnute ploče dobivene tijekom ovog istraživanja nisu bile dostupne.

Ovo je istraživanje potvrđivanje koncepta koje je uključivalo ploče u različitim fazama. Za izradu ploča bila su potrebna tri mjeseca, nakon čega su uslijedila dodatna tri mjeseca za početna tvornička ispitivanja kako bi se procijenila proizvodnja i mobilnost tvornice. Ispitivanja statičkim opterećenjem i procjene dokaza koncepta za mehanički dizajn zahtijevale su još dva mjeseca. Vanjske čelične ploče, mehanički povezane s

betonskom jezgrom pomoću moždanika, izvedene su kako je predviđeno, pružajući vanjsko pojačanje slično onom betonske jezgre. Interakcija oslonca između betona i moždanika bila je očita, s lokaliziranim tlačnim slomom uočenim na betonu u kontaktu s moždanicima. Statički slom ploča nastao je zbog loma betonske jezgre koja je ostala pričvršćena za čelične ploče. Posljednja faza provjere koncepta uključivala je provođenje stvarnih testova opterećenja eksplozijom, za što su bila potrebna dodatna dva mjeseca za organizaciju. Poligon za testiranje bio je potpuno popunjen, a dostupnost vremena i resursa zahtijevala je znatne napore. Dvije spregnute ploče bile su pričvršćene vijcima na svaki kraj okvira, kako bi, po potrebi, osigurali mehanizam lančanice. Ploče su uspješno izdržale sve testove, iako je posljednji test rezultirao značajnim lokaliziranim oštećenjima. Kao što se očekivalo, unutarnje područje oko eksplozivnog naboja pretrpjelo je ozbiljna oštećenja, ali ta su oštećenja ostala unutar ploča, koje su učinkovito sadržavale zonu puknuća između ploča. Ova istraživanja pokazuje da je dizajn spregnute ploče, s vanjskim čeličnim pločama koje služe kao vlačna potpora i ograničenje za betonsku jezgru, valjan. Uključivanje čeličnih vlakana u omeđeni beton povećava njegovu sposobnost apsorpcije energije, dok čelične ploče svojom plastičnošću doprinose dodatnoj apsorpciji energije.

Da je autor imao dovoljno sredstava, vremena, resursa i organizacijskog iskustva, mogli su se provesti dodatna ispitivanja uz sofisticirane instrumente. Nisu postojali ni vrijeme ni sredstva za provođenje dubinske analize plastificiranih čeličnih ploča. Volumetrijske analize i mehanički testovi uzoraka dobivenih iz probijenih čeličnih ploča pokazali bi energiju apsorbiranu tijekom eksplozije. Dio usitnjenog betona izgubljen je tijekom transporta; iako je provedena granulometrijska analiza preostalog lomljenog betona, sveobuhvatna analiza dala bi uvid u ukupni volumen uništen tijekom eksplozije i, posljedično, energiju apsorbiranu tijekom lomljenja i raspršivanja. Takve detaljne korelacije između oštećenog materijala i ulazne energije mogle bi kvantitativno karakterizirati odnos između djelovanja eksplozije i konstrukcijskog odgovora. Implementacija mjernih uređaja za visoke frekvencije na potporama i duž ploča mogla bi zabilježiti reakcije savijanja i lančano djelovanje ploča uslijed sila eksplozije. Tijekom faze projektiranja materijala, analiza naprezanja i deformacija zasnovana na pomaku projektiranog betonskog materijala pri promjenjivim stopama opterećenja pružila bi bolji prikaz projektiranog materijala.

Unatoč ovim ograničenjima, ovo je istraživanje uspješno postiglo svoj cilj u razdoblju od 12 mjeseci: dokazivanje načela oblikovanja na kojem se temelje predgotovljene ploče. Intrinzične mehaničke kvalitete dizajna potvrđene su tijekom ispitivanja eksplozijom. Predloženim projektom spregnute ploče nudi se visok omjer čvrstoće i težine i predstavlja održivo rješenje za poboljšanje sigurnosti vojnih i civilnih konstrukcija od eksplozivnih prijetnji.

LITERATURA

- [1] Goel, D.M., Matsagar, V.A.: Blast-Resistant Design of Structures, Practice Periodical on Structural Design and Construction, 19 (2013) 2.
- [2] Olmati, P., Trasborg, P., Naito, C.J., Bontempi, F.: Blast resistant design of precast reinforced concrete walls for strategic infrastructures under uncertainty, International Journal of Critical Infrastructures, Inderscience Enterprises Ltd, 11 (2015) 3, pp. 197-212.
- [3] ACI PRC-370-14: Report for the Design of Concrete Structures for Blast Effects, 2014.
- [4] Shi, Y., Xiong W., Li, Z.X., Xu, Q.: Experimental studies on the local damage and fragments of unreinforced masonry walls under close-in explosions, International Journal of Impact Engineering, 90 (2016), pp. 122-131.
- [5] Shi, Y., Wang, J., Cui, J.: Experimental studies on fragments of reinforced concrete slabs under close-in explosions, International Journal of Impact Engineering, 144 (2020).
- [6] Mahima, G.R., Shivamanjunathaswamy, H.G., Kiran, T.: Behavior of steel concrete composite wall panel under blast load, International Research Journal on Advanced Engineering Hub, 2 (2024) 6, pp. 1768-1775.
- [7] Dusenberry, D.: Anticipating the Post Blast Conditions of Structures, Canadian Journal of Civil Engineering, 36 (2009), pp. 1340-1344.
- [8] Bischoff, P.H., Perry, S.H.: Compressive behavior of concrete at high strain rates, Matériaux Et Constructions, 24 (1991) 6, pp. 425-450.
- [9] Gebbeken, N., Greulich, S., Pietzsch, A.: Performance of Concrete Based Building Materials Against Blast and Impact, Proceedings of the fib-Symposium on Concrete and Environment, Berlin, 2001.
- [10] Dusenberry, D.: Handbook for Blast Resistant Design of Buildings, John Wiley and Sons, 2010.
- [11] Draganić, H., Varevac, D.: Numerical simulation of effect of explosive action on overpasses, GRAĐEVINAR, 69 (2017) 6, pp. 437-451, <https://doi.org/10.14256/JCE.1943.2016>
- [12] Ning, J., Yang, S., Ma, T., Xu, X.: Fragment behavior of concrete slab subjected to blast loading, Engineering Failure Analysis, 138 (2022) 8.
- [13] Gebbeken, N., Döge, T.: Explosion Protection-Architectural Design, Urban Planning and Landscape Planning, International Journal of Protective Structures, 1 (2010) 1.
- [14] Yu, R., Spiesz, P., Brouwers, H.J.H.: Energy absorption capacity of a sustainable Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete [UHPRFC] in quasi-static mode and under the high-velocity projectile impact, Cement and Concrete Composites, 68 (2016), pp. 109-122.
- [15] Lai, J., Sun, W.: Dynamic behaviour and visco-elastic damage model of ultra-high performance cementitious composite, Cement and Concrete Research, 39 (2009) 11, pp. 1044-1051.
- [16] Grote, D.L., Park, S.W., Zhou, M.: Dynamic behavior of concrete at high strain rates and pressures: I. experimental characterization, International Journal of Impact Engineering, 25 (2001) 9, pp. 869-886.
- [17] Bounds, W.: Concrete and Blast Effects, ACI International, SP-175.
- [18] Elmezaini, N., Ashour, M.: Nonlinear Analysis of Concrete Beams Strengthened with Steel Fiber-Reinforced Concrete Layer, Journal of Engineering Research and Technology, 2 (2015) 3.
- [19] Erdem, R.T., Berberoğlu, M., Gücüyen, E.: Investigation of concrete slabs made with cement based mortars under impact loads, GRAĐEVINAR, 75 (2023) 2, pp. 117-127, <https://doi.org/10.14256/JCE.3159.2021>
- [20] Venkatesh, K.: Properties of Concrete at Elevated Temperatures, International Scholarly Research Notices, 2014, Article ID 468510, 15 pages.
- [21] Guide to Thermal Properties of Concrete and Masonry Systems, ACI 122R-02, American Concrete Institute, 2002.
- [22] Miller, D., Ho, N.M., Talebian, N., et al.: Real-time monitoring of early-age compressive strength of concrete using an IoT-enabled monitoring system: an investigative study, Innov. Infrastruct. Solut., 8 (2003) 75.
- [23] FIB, N° 42.: Constitutive modelling for high strength / high performance concrete, State-of-art report, ISBN 978-2-88394-082-6, January 2008
- [24] Nilson, A.: Design of Concrete Structures, WCB McGraw-Hill, (1997) 12. pp.77-79.