

EKSPERIMENTALNO MODELIRANJE IMPULSOM OPTEREĆENIH AB PLOČA

docent dr Nebojša Đuranović, dipl. građ. inž.

Građevinski fakultet Univerziteta Crne Gore,
Cetinjski put,
81.000 Podgorica

SAŽETAK

Prikazan je adekvatni model sa zanemarenom silom zemljine teže, koji je primijenjen u cilju proučavanja odgovora AB ploča na udarno opterećenje nastalo od eksplozije na bliskom odstojanju. Parametri udarnog talasa su modelirani korišćenjem principa "kubnog korijena". Prezentiraju se i upoređuju rezultati dobijeni na modelima izrađenim u dvije različite razmjere. Pri tome posmatrano je modeliranje samih uzoraka, udarnog opterećenja, izmjerenih ugiba, kao i ostvarenih lokalnih i globalnih oštećenja uzorka.

KLJUČNE RIJEČI

uslovi sličnosti, adekvatni model, eksplozija, kubni korijen, ugibi, oštećenja

1 **Uvod**

Modeliranje građevinskih konstrukcija primjenom modela različitih razmjera je pouzdan i široko primjenjivan način određivanja karakteristika i odgovora materijala i konstrukcija pod raznim formama opterećenja. Ono omogućava značajne praktične i ekonomske prednosti u odnosu na ispitivanje konstrukcija u prirodnoj veličini i pod punim opterećenjima. To je posebno izraženo kada se govori o modeliranju konstrukcija izloženih udarnom talasu eksplozije, jer se upotrebom modela izbjegava upotreba većih količina eksploziva, i na taj način smanjuje neminovni rizik.

Među potencijalnim problemima, zbog kojih se ispitivanje pod udarnim opterećenjem i ubraja u kategoriju najkomplikovanijih eksperimenata, spadaju i:

- Neophodnost posjedovanje adekvatne mjerne opreme, pri čemu se u razmatranje uzima brzina i kratkoća djelovanja nanesenog opterećenja;
- Neophodnost posjedovanja pouzdanog i izdržljivog sistema za prikupljanje podataka, koji takođe u pojedinim situacijama može biti izložen udarnom talasu;
- Problemi povezani sa dimenzionisanjem i potom eventualnim modeliranjem udarnog talasa koji zadovoljava namjenu eksperimenta ;
- Obezbjedenje nepomjerljivosti referentnog sistema u odnosu na koji se vrše mjerenja;
- Fizičko obezbjeđenje osoblja i opreme prije, tokom i nakon izvršenog ispitivanja; i
- Obezbjedenje okolnog prostora od posledica nanošenja opterećenja na ispitivani uzorak.

Inače, opterećenja udarnim talasom eksplozije su moguća, pored onih koja nastaju kao posledica sračunatih i predhodno planiranih terorističkih ili vojnih akcija, i usljed cijelog niza drugih aktivnosti i radnji. Na primjer tokom skladištenja, transportovanja i proizvodnje eksplozivnih i jako zapaljivih substanci, u hemiskoj i petro-hemiskoj industriji, usljed popuštanja kontejnera pod pritiskom, usljed eksplozije plinskih boca, usljed eksplozija gasa koji se može nagomilati usljed dotrajalosti i oštećenja na gasovodima, kao i u mnogim drugim sličnim situacijama.

Kada se eksplozija dogodi u neposrednoj blizini AB elementa tada se rezultirajuća opterećenja nanose prvo u najbližoj, veoma ograničenoj oblasti elementa, epicentru, a onda nastavljaju da se mijenjaju sa vremenom i udaljenjem po površini elementa, a sve kao posledica značajne zakrivljenosti udarnog talasa eksplozije. Kao rezultat toga imamo ponašanje koje se obično dijeli na lokalni i globalni odgovor konstrukcije sa različitim vremenima pojavljivanja.

Lokalni odgovor se u osnovi karakteriše razvojem centralne zone smicanja koja je oblika zarubljene kupe (*engleski: shear plug*) [1] pri čemu se sva značajnija oštećenja i deformacije nalaze u neposrednoj blizini epicentra eksplozije ili udarne sile.

2 **Primijenjeni principi modeliranja**

Model u ispitivanju konstrukcija obično se definiše kao konstruktivni elemenat ili konstrukcija izvedena u umanjenoj razmjeri u odnosu na stvarnu veličinu, koja se izlaže modeliranim opterećenjima u cilju dobijanja rezultata koji mogu da definišu ponašanje stvarne konstrukcije ili konstruktivnog elementa (prototipa). Pri tome oni moraju biti izrađeni u skladu sa zahtjevima teorije sličnosti modela i prototipa, kako bi se rezultati sa modela mogli na kvalitetan način interpretirati na prototip.

U tom smislu, pod pojmom modeliranja podrazumeva se proces analiziranje određenih pojava, parametara i veličina na stvarnoj inženjerskoj konstrukciji - prototipu, putem njihovog upoređivanja sa pojavama, parametrima i veličinama koje su registrovane, kvantifikovane i objašnjene ispitivanjem modela te stvarne konstrukcije. Ono je danas toliko teorijski i praktično potkrijepljeno dokazima i primjerima da se iz rezultata testova na modelima može steći potpun uvid u ponašanje, tj. odgovor stvarne konstrukcije za zadata opterećenje i posmatrane parametre ponašanja (kao što su ugibi, pomjeranja, deformacije, rotacije, naponi, nosivosti, oštećenja itd), koji se mogu potpuno pouzdano odrediti testiranjem modela, umjesto testiranja stvarne konstrukcije.

Da bi smo mogli upotrebljavati modele pri eksperimentalnom ispitivanju konstrukcija, neophodno je predhodno uspostaviti jasno definisane matematičke veze između modela i prototipa. Ove veze se nazivaju uslovima sličnosti, pravilima za modeliranje ili uslovima modelske analize. One se određuju korišćenjem principa sličnosti.

Postupak modeliranja se sprovodi na osnovu određenih principa koji se baziraju na geometrijskim odnosima modela i prototipa, mehaničkim svojstvima upotrijebljenih materijala, odnosima nanesenih opterećenja i drugim sličnim faktorima od kojih zavisi naponsko - deformacijsko stanje modela. Ovi principi i njihovi kvantifikativni parametri (veličine koje se mjere) su značajni pri uspostavljanju odnosa koji važe između pojedinih veličina utvrđenih na modelu i njihove interpretacije na prototip.

Izučavanjem tih pitanja bavi se teorija sličnosti koja se pojavljuje kao teorijska osnova modeliranja. Ona je izvedena iz dimenzionalne analize fizičkih pojava koje karakterišu ponašanje posmatrane konstrukcije. U tom smislu, da bi bili ispunjeni zahtjevi dimenzionalne analize pri modeliranju konstrukcija potrebno je zadovoljiti njena dva osnovna postulata, koji glase:

- *Odnos vrijednosti dva slična, uporediva, parametra (veličine koje mjerimo) je potpuno nezavisan od jedinica u kojima su one izražene, ili, rečeno na drugi način: odnos dvije slične veličine je nezavisan od primijenjenih jedinica za njihovo mjerenje, pod uslovom da su obje prilikom upoređivanja mjerene istim jedinicama.*
- *Oblik jednačine kojom se kvantifikuje određena pojava je nezavisan od veličine jedinica u kojima se mjerena veličina izražava, ili, rečeno na drugi način: matematička veza (jednačina) koja opisuje ponašanje konstrukcije mora biti dimenzionalno ispravna i nakon prelaska sa prototipa na model, bez obzira na posmatrane parametre ponašanja (npr. napon, deformacija, ugi itd.) koji kvantifikuju efekte odgovora konstrukcije.*

Prvi postulat kaže da ako su, na primjer [2] dužina i širina posmatranog elementa 3m i 1m, tada je odnos dužine i širine jednak 3 bez obzira u kojim se mjernim jedinicama mjerenje vrši, tj. odnos je isti i ako mjerimo, metrima i inčima i pedama, itd.

Drugi postulat kaže da, ako se na primjer, normalni napon σ za presjek površine A opterećen aksialnom silom P određuje jednačinom $\sigma = P/A$, da bi se ta jednačina mogla koristiti pri modeliranju ona mora važiti bez obzira na jedinice koje izaberemo za P tj A . (kN, metre, feete, inče itd). Jednačine koje zadovoljavaju ovaj uslov nazivamo *kompletnim jednačinama*. Takve nisu jednačine koje recimo sadrže koeficijente koji nisu bezdimenzionalni - na primjer, izraz za određivanje modula elastičnosti E_b u odnosu na čvrstoću betonske kocke f_{bk} koji glasi :

$E_b = 9.25 \cdot \sqrt[3]{f_{bk}^2}$ i koji propisuje u kojim se jedinicama (MPa) moraju ispisati predhodne veličine.

Ovakve jednačine se ne mogu direktno modelirati.

Fundamentalne veličine koje se koriste pri dimenzionalnoj analizi su dužina, vrijeme, sila (ili masa), temperatura i električno punjenje. Kod modeliranja u građevinarstvu, gdje su problemi u svojoj osnovi mehaničke prirode, svakako da su najbitnije prve tri veličine.

Direktna posledica gore datog drugog postulata dimenzionalne analize je i Bekingmova, π - teorema. Ona kaže da se može pokazati da se jednačina sa k promjenljivih X , ako se radi o kompletnoj jednačini, može izraziti kao veza sa $k - r$ nezavisnih bezdimenzionalnih veličina π , gdje je r broj osnovnih dimenzija potrebnih da opišu promjenljive u početnoj (kompletnoj) jednačini. To praktično znači da se broj promjenljivih u jednačini koja opisuje određenu pojavu može smanjiti za najviše onoliko nepoznatih koliko imamo osnovnih, tj. fundamentalnih promjenljivih koje opisuju posmatranu pojavu.

Pri tome se svaka veza, tj. jednačina F koja definiše ponašanje prototipa, a ima oblik:

$$F(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0$$

može izraziti kao bezdimenzionalna veza (jednačina):

$$G(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_k) = 0$$

gdje su π_1 do π_k bezdimenzionalni parametri ponašanja konstrukcije, koji su predhodno bili dati u uobičajenom obliku kroz fizičke veličine X_1 to X_k . (tj. napone, dužine, ubrzanja itd).

Kako je predhodno rečeno, ova transformacija omogućava redukciju broja nepoznatih parametara n koji u potpunosti definišu ponašanje konstrukcije, jer kod modela imamo $k = n - r$ gdje je r broj osnovnih (fundamentalnih) dimenzija koje su uključene u ponašanje konstrukcije (kod dinamičkih ispitivanja $r = 3$) a n broj parametara X koji potpuno opisuju ponašanje posmatrane konstrukcije. Ovo praktično znači da, recimo, problem iz oblasti dinamike konstrukcija, koji je definisan jednačinom sa recimo $n = 6$ parametara, može biti smanjen pri modeliranju, tj. pri određivanju odnosa parametara ponašanja (kao što su npr. napon, sila, dilatacija itd.) između prototipa i modela, na samo 3 parametra, jer je broj fundamentalnih veličina $r = 3$ (dužina, vrijeme i masa).

Ovi G (bezdimenzioni) izrazi se zovu *projektne jednačine*. One se pišu i za prototip i za model i u principu potpuno su identične, samo kod jednih stoji oznaka p - prototip, a kod drugih oznaka m - model. Kada se projektne jednačine za model i za prototip podjele, dobija se *jednačina predviđanja*.

Pri modeliranju konstrukcije mogu se upotrijebiti modeli koji imaju *potpunu (strogu) sličnost* sa prototipom, pri čemu su svi bezdimenzioni faktori modeliranja (*razmjere preobražaja*) potpuno jednaki za prototip i model. Znači, da bi bili zadovoljeni uslovi potpune sličnosti između modela i prototipa mora biti zadovoljen uslov da je:

$$\pi_{i,modela} = \pi_{i,prototipa}$$

Kako je obično veoma teško uspostaviti potpunu sličnost prototipa i modela, često se ide na *adekvatne modele (djelimična sličnost)*, koji imaju znatnu sličnost sa prototipom, pri čemu oni eliminišu (ne razmatraju) one parametre ponašanja koji nisu bitni za odgovor konstrukcije. Znači,

ako pojedini bezdimenzioni odnosi iz modela i prototipa nisu zadovoljeni, tj može se naći makar jedan za koji važi:

$$\pi_{\text{modela}} \neq \pi_{\text{prototipa}}$$

tada imamo adekvatni model, tj. djelimičnu sličnost. Pri tome bezdimenzioni faktor koji nije zadovoljen ne smije uticati na parametar, tj. indikator ponašanja koji se posmatra.

Na primjer, ako se posmatra problem modeliranja ukupnih ugiba grede (i od savijanja, i od smicanja) tada je neophodno da su zadovoljene bezdimenzione veze po širini grede modela i prototipa, kao i bezdimenzione veze po visini grede modela i prototipa [2]. Međutim, ako se razmatra dio ugiba koji je posledica samo momenata savijanja, tada u izrazima za ugib ne figurišu odvojeno širina i visina grede već samo moment inercije presjeka, pa i uslove sličnosti možemo da ostvarujemo poštujući samo odnose momenata inercije modela i prototipa, pri čemu uslovi po širinama i visinama modela i prototipa ne moraju biti zadovoljeni. To znači da, u krajnjem slučaju, ni oblik poprečnog presjeka modela i prototipa ne mora biti isti, jer je jedini uslov koji se traži taj da postoji zahtijevana sličnost između momenata inercije prototipa i modela. Takav model, koji daje tačne rezultate samo za određene segmente ponašanja zove se znači adekvatni model, ili model koji ima djelimičnu sličnost.

Na kraju, kada se moraju zanemariti veoma značajni parametri, koji direktno utiču na rezultate ispitivanja čak i za izdvojeni problem, tada se kaže da imamo tz. *poremećene modele* ili *izobličenu sličnost*.

Razmatranje parametara modeliranja kod udarnih opterećenja uključuje modeliranje funkcije opterećenja (sila, napon, vrijeme, ubrzanje, gravitacija), geometriju uzorka koji se ispituje (geometrijske dimenzije, pomjeranja i dilatacije) kao i karakteristike materijala (modul elastičnosti, Poasonov koeficijent, specifičnu težinu i gustinu).

Pristup pri kome bi imali potpunu sličnost konstrukcije (prototipa) i modela zahtijeva izbor tri parametra ponašanja (mjerene, tj. posmatrane veličine) za koje se mogu izabrati nezavisne veličine razmjere, [3] [4]. Pri tome, mogu biti izabrane samo tri takve veličine, zato što, kao što je rečeno, postoje samo tri nezavisne fundamentalne veličine (dužina, masa (sila) i vrijeme) čijim kombinacijama je potpuno definisano ponašanje posmatranog elementa. Kako u svim mogućim kombinacijama pobrojanih parametara ponašanja kod dinamičkih opterećenja (sem u veoma rijetkim i specijalnim laboratoriskim uslovima u kojima se kontroliše i gravitacija zemlje) ubrzanje zemljine teže mora biti jednako i za prototip i za model (razmjera $R_g = 1$), ostaju samo dva nezavisna parametra čije razmjere iz prototipa i modela možemo izabrati proizvoljno. Kao takve nezavisne parametre možemo, recimo, izabrati razmjere Poasonovog koeficijenta ν i brzinu V . Kao posledica predhodnog izbora tri veličine čije smo razmjere odredili nezavisno, a da bi se ispunili uslovi dimenzionalne analize pri potpunoj sličnosti za ostale posmatrane veličine, dolazimo do situacije gdje su vrijeme, dužine i pomjeranja modelirani razmjerom konstantnih faktora, a dilatacije, gravitacija, Poasonov koeficijent i brzina bi bili isti za prototip i za model. Međutim, nažalost, u takvoj situaciji, modeliranje mase, gustine, sile i napona bi zahtijevalo upotrebu različitih modula elastičnosti materijala prototipa i modela. Ovo bi neminovno vodilo primjeni različitog materijala u modelu od onoga u prototipu, što je rijetko prihvatljivo. Prema tome primjena modela potpune sličnosti u ovom slučaju je veoma otežana.

Model koji je za očekivati da se koristi, i koji se pokazao najkvalitenijim za modeliranja ovakve vrste opterećenja i pojava, je onaj gdje imamo iste mehaničke karakteristike materijala u modelu i

prototipu, kao i potpunu sličnost geometrije prototipa i modela (znači linearno smanjenje modela u odnosu na prototip). Jedan od mogućih adekvatnih modela koji zadovoljava ove uslove se zove *model sa zanemarenom gravitacijom* (engleski: *Gravity Forces Neglected Model*). Njegova glavna razlika u odnosu na model potpune sličnosti je, kako mu i ime kaže, da je zanemaren uticaj gravitacionog ubrzanja. Ovo uprošćenje unosi zanemarljivu grešku pri modeliranju, budući da gravitacione sile ne predstavljaju značajan dio opterećenja kod testiranja udarom ili eksplozijom. Za ovaj adekvatni model veze parametara iz prototipa i modela, kroz njihove razmjere, su sračunate i predstavljene u donjoj tablici 1, pri čemu R_l predstavlja usvojeni linearni faktor razmjere, a "1" znači da je razmjera između prototipa i modela jednaka jedinici, tj. $R = 1$. S, L i T predstavljaju jedinice sile, dužine i vremena.

Pored toga, treba reći da je u ovom radu prikazano adekvatno modeliranje koje praktično ne uzima u obzir efekte brzine deformisanja uzorka pod udarnim opterećenjem (za upoređenja sa uzorcima druge veličine koji su takode izloženi udarnom opterećenju) niti, što smo vidjeli, uticaje gravitacije, već se oni smatraju zanemarljivim.

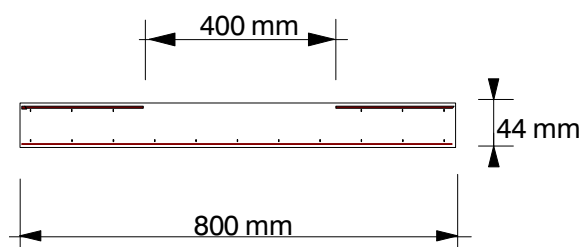
Tablica 1 - Razmjere između parametar ponašanja prototipa i modela kod modeliranja udarnog opterećenja principima zanemarenja gravitacionog ubrzanja

<i>Parametri ponašanja</i>	<i>Jedinica</i>	<i>Razmjera</i>
<i>Sila</i>	S	R_l^2
<i>Pritisak</i>	SL-2	1
<i>Vrijeme</i>	T	R_l
<i>Ubrzanje gravitacije</i>	LT-2	<i>Zanemareno</i>
<i>Brzina</i>	LT-1	1
<i>Geometriske dužine</i>	L	R_l
<i>Ugibi (pomjeranja)</i>	L	R_l
<i>Dilatacija</i>	-	1
<i>Modul elastičnosti</i>	SL-2	1
<i>Napon</i>	SL-2	1
<i>Poisonov koeficijent</i>	-	1
<i>Gustina</i>	ST ² L-4	1

3 Geometriski linearno modeliranje uzoraka i sastavnih materijala

Armirano betonske ploče, pravougaonog poprečnog presjeka i kvadratne osnove, koje su korišćene u ovom istraživanju zasnovane se na tipičnim konstruktivnim elementima ovoga tipa, koji se mogu naći u različitim vrstama objekata. Modeli su tako definisani da predstavljaju približno $R = 1:4$ i $R = 1:10$ umanjena tipičnih ploča. Znači, male ploče (oznake SE) modeliraju veće ploče (oznake LSE) u razmjeri 1:2,5.

Dimenzije manjeg modela uzorka su date na slici 2. Sve četiri strane ploče su imale identične oslonce tipa uklještenja, koji su potpuno onemogućavali horizontalna i vertikalna pomjeranja i, skoro u potpunosti, i rotacije oslonačkih zona ploče.



Mrežasta armat. 3.15 mm na svakih 76.2 mm
Zaštitni sloj betona: 4 mm

Slika 2. Poprečni presjek manjeg modela AB ploče

Prilikom predmetnog ispitivanja, a u skladu sa predhodno rečenim, beton koji je primjenjivan za AB ploče u obje razmjere je bio istih mehaničkih karakteristika. Da bi se to postiglo išlo se na pažljivo predhodno ispitivanje korišćenih betonskih mješavina, čime je utvrđeno da se najbolji rezultati dobijaju ako se za najveće zrno agregata kod umanjenog modela, razmjera 1 : 2,5, usvoji ista ta osnovna razmjera - koja pokazuje odnos geometričkih dimenzija prototipa i modela.

Tako, agregat koji je upotrebljavan u uzorcima većih ploča (ploče dimenzija 2 x 2 m, R = 4) je bio rečni agregat najvećeg zrna 10 mm, dok je kod modela malih ploča (ploče dimenzija 0.8 x 0.8 m, R = 10), kao agregat korišćen lagano isprani riječni pijesak, max. veličine zrna od 4 mm.

Težinski odnosi upotrijebljene betonske mješavine za obje korišćene razmjere modela je prikazan u tablici 2. Pri tome je korišćena ista vrsta cementa. Prosječna ostvarena čvrstoća betona na pritisak korišćenjem ovih mješavina bila je reda veličine oko 40 MPa.

Tablica 2. Mješavine korišćenje za AB ploče

	cement	pijesak	šljunak	voda
Mikro betonska mješavina	1	3	-	0.6
Makro betonska mješavina	1	2.28	3	0.6

Gotovo identičan procenat armiranosti modela i prototipa, koji predstavlja jedan od osnovnih zahtijeva linearnog geometričkog modeliranja, najefikasnije se mogao postići na način primijenjen i u ovom ispitivanju - tako što su i rastojanje armaturnih šipki i veličina prečnika šipki u manjem modelu bili umanjeni u odnosu na veći model za manje-više istu vrijednost usvojene geometriske razmjere - $R_l = 2.5$.

Pri tome, radi jednostavnosti izrade armaturnih koševa, kod manjih modela korišćene su gotove mreže, koje su imale prečnik šipki 3.15mm i njihovo rastojanje u oba pravca je iznosilo 76.2mm x 76.2mm. Konačno, ova mreža je imala nosivost na zatezanje oko 113% od tražene, ali, što je takođe bilo uzeto u razmatranje, rastojanje šipki je bilo 95% od potrebnog. Sami procenti armiranja, kao i glavni parametar funkcije opterećenja - odstojanja na kojima se nalazilo eksplozivno punjenje, za uzorke koji će se razmatrati u ovom tekstu, su prikazani u donjoj tablici 3.

Tablica 3. Osnovni podaci o izvršenim testovima

	Oznaka ploče	Odstojanje punjenja (mm)	Zategnuta armatura	
			X pravac	Y pravac
Veći modeli	LSE1	350	1.2 %	1.2 %
	LES2	250	1.2 %	1.2 %
	LSE3	500	0.4 %	0.4 %
	LSE5	200	0.4 %	0.4 %
Manji modeli	SE5	100	1.25 %	1.05 %
	SE12	150	0.29 %	0.27 %
	SE11	200	0.29 %	0.27 %
	SE15	75	0.29 %	0.27 %

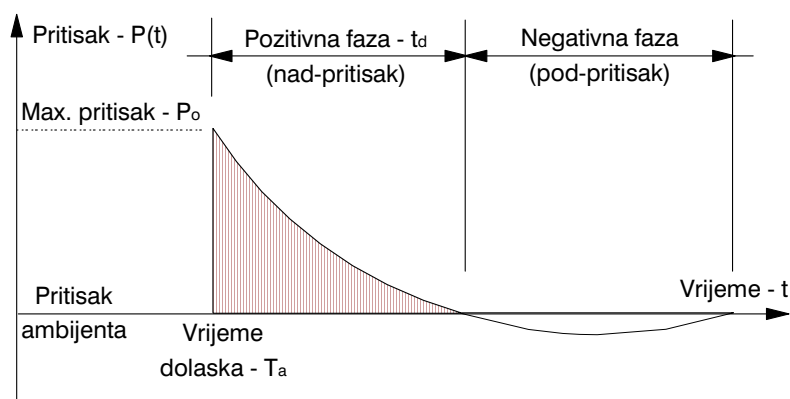
Inače, eksplozivna punjenja korišćena u ovim ispitivanjima su bila napravljena od PE4 koji ima gustinu 1590 kg/m^3 , pritisak u trenutku detonacije $2,68 \times 10^7 \text{ KN/m}^2$ i specifičnu energiju 5111 KJ/kg^2 , što mu daje TNT ekvivalent od 1,13. Punjenja su bila oblika polusfere, prečnika 57 mm sa zakrivljenom stranom okrenutom prema uzorku. U svim testovima punjenja su inicirana sa ravne strane, pri čemu je težina punjenja za manje modele AB ploča uvijek bila 78 grama. Udarni talas nastao usled eksplozije PE4 putovaće na malim rastojanjima brzinom od 7500 m/sek [5].

Rastojanje punjenja od uzorka definisano je kao čisti razmak među njima. Svi testovi su izvedeni u (sa gornje strane) otvorenom prostoru, koji je bio oblika pravougaonika - dimenzija $5 \times 2 \text{ m}$, visine zida od 2.5 m, izgrađen od betonskih blokova, sa betonskim podom.

4 Modeliranje funkcije opterećenja

Da bi se utvrdila mogućnost modeliranja potrebno je predhodno definisati glavne parametre eksplozivnog opterećenja, jer definisanje funkcije opterećenja ploče samo po sebi ima prvorazredni značaj sa stanovišta analize rezultata testova.

Eksplozivni talas, kao izvor dinamičkog opterećenja na konstrukciji, se kvantifikuje uz pomoć nekoliko osnovnih parametara. To su maksimalni nivo nad-pritisaka P_o udarnog talasa eksplozije, vrijeme dolaska eksplozivnog talasa T_a , vremensko trajanje faze nad-pritisaka t_d i vremensko trajanje faze pod-pritisaka. Svi oni su grafički predstavljeni na slici 3.

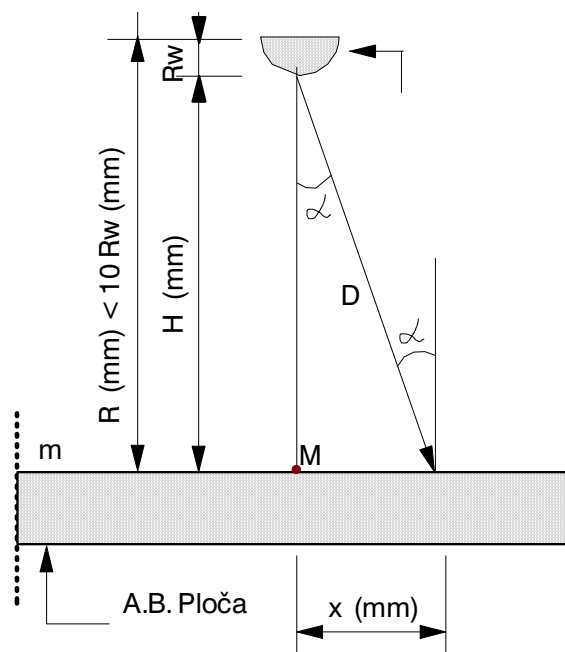


Slika 3. Parametri opterećenja od eksplozivnog talasa

Pored ovih osnovnih parametara, značajno je pomenuti i impuls / udarnog talasa:

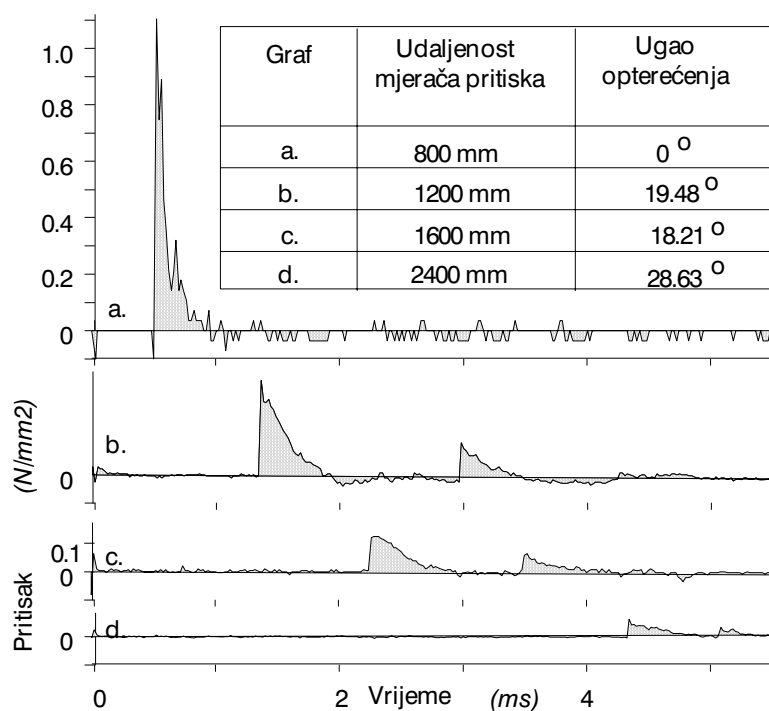
$$I^+ = \int_{T_a}^{t_d} P \cdot t$$

Slučaj kada je $R_w < a \leq 10R_w$ pri čemu je R_w poluprečnik eksplozivnog punjenja a a udaljenost do njegovog središta (slika 4) smatra se bliskom ili eksplozijom u blizini konstrukcije. Sva istraživanja ovdje izložena pripadaju toj kategoriji opterećenja.



Slika 4. Uticajni faktori funkcije opterećenja

Tipični rezultat mjerenja ostvarenih opterećenja sa jednog od testova na manjim uzorcima prikazan je na slici 5.



Slika 5. Tipični dijagram pritisk/vrijeme za punjenje od 78g

Pravila modeliranja talasa impulsnog opterećenja zasnovana su na očuvanju početne energije i geometrijskoj sličnosti. Geometrijska sličnost trodimenzionalnih tijela (poput eksplozivnog punjenja koje se modelira) vodi do principa modeliranja pomoću kubnog korijena (engleski: "*cube root scaling laws*"), koja se danas najčešće i koriste za modeliranje dejstva impulsnih talasa. Sva modeliranja veličina eksplozivnog punjenja i njegove udaljenost od uzorka u slučaju ispitivanja predstavljenih u ovom članku bazirani su na pravilu kubnog korijena. Pored toga, a uzimajući u obzir činjenicu da je eksploziv TNT praktično svuda prihvaćen kao jedinica mjere različitih karakteristika udarnog talasa, i na ovom mjestu će se za opis procesa modeliranja oslobođene energije i ostalih parametara udarnog talasa koristiti jedinica od 1 kg TNT eksploziva, pri čemu se upoređenja daju u odnosu na sferično punjenje od date količine eksploziva.

Po pravilima koja važe za modeliranje pomoću kubnog korijena, dvije eksplozije će proizvesti identične udarne talase na udaljenjima koja su proporcionalna kubnom korijenu njihovih oslobođenih energija, koje se uzimaju kao glavni kontrolni parametar. Očuvanje energije se uvodi kroz posmatranje gustine atmosferskog omotača, koja predstavlja mjeru mase vazduha, što nas dovodi do konačnog izraza za modelirane udaljenosti Z punjenja od posmatrane tačke na konstrukciji. Ta dužina iznosi:

$$Z = \frac{f_d \cdot (\text{stvarno udaljenje})}{\sqrt[3]{W}}$$

gdje je:

- f_d - bezdimenzioni odnos gustine atmosfere kroz koju udarni talas putuje i gustine atmosfere kod referencnog udarnog talasa (eksplozije).
- W - masa eksploziva (dato u kg TNT)

Ako se uzme da je f_d jednako jedinici, može se pokazati da dva eksplozivna punjenja istog oblika i vrste eksploziva, ali različitih masa M_1 i M_2 imaju iste najveće vrijednosti pritiska na udaljenjima od središta punjenja čiji je odnos:

$$R_1 = k \cdot R_2 \quad \text{gdje je : } k = \sqrt[3]{\frac{M_1}{M_2}}$$

Međutim, treba obratiti pažnju na činjenicu da, iako će najveći nivo pritiska u posmatranoj tački - a koji je jedan od glavnih mjera udarnog talasa - na rastojanjima R_1 i R_2 biti isti, nemogućnost skaliranja vremenske komponente znači da ostali važni parametri udarnog talasa, poput dužine trajanja pozitivnog dijela udarnog talasa T_d i njegovog impulsa I neće biti isti. Može se pokazati da će oni iznositi:

$$I_1 = k \cdot I_2 \quad \text{tj.} \quad Td_1 = k \cdot Td_2$$

Pri predhodnim razmatranjima posmatrana su identična atmosferska okruženja referentne i posmatrane eksplozije. U slučaju da to nije tako, svi predhodno dati izrazi moraju biti u određenoj mjeri korigovani, uslijed različitih gustina i temperatura vazduha.

Sem nekoliko početnih ispitivanja (koja nisu ovdje ni prezentirana) kada su punjenja bila u obliku cilindra, u svim ostalim testovima korišćena su polusferična punjenja, pri čemu je sferični dio bio okrenut prema uzorku. Ona su bila ručno napravljena, sabijanjem eksploziva koji je dolazio u obliku "fišeka" težine 454 g, u specijalne za tu namjenu napravljene kalupe od gume. Na taj način

postizana je potpuna uniformnost oblika, gustine i težine punjenja. Za potrebe detoniranja ovako napravljenih punjenja tokom ovih eksperimenata korišćeni su izuzetno precizni L2A1 detonatori (vrijeme kašnjenja do 0.2 msec) koji su bili postavljeni u predhodno formirane 10mm duboke rupe u centru ravne strane polusferičnog punjenja. Korišćenjem izolacione trake i ležišta formiranih od stiropora ovako formirana punjenja su bila pričvršćivana na propisana mjesta i udaljenosti od ispitivanih uzoraka.

Punjenja koja su korišćena za testove u većoj razmjeri bila su mase 1300 gr, pri čemu je ta težina definisana u odnosu na prostoriju gdje je vršeno ispitivanje, i koja je bila atestirana za te količine eksploziva. Prečnik toga većeg modeliranog punjenja je bio 142.5mm.

Predhodno objašnjeno modeliranje principima kubnog korijena pokazuje da će eksplozivno punjenje M_1 od 1300 gr proizvesti isti nadpritisak i brzinu udarnog talasa na udaljenosti R_1 od punjenja kao i modelirana masa M_2 istog oblika i od istog eksploziva, na udaljenosti R_2 , ako je zadovoljen uslov da je:

$$\frac{R_1}{\sqrt[3]{M_1}} = \frac{R_2}{\sqrt[3]{M_2}}$$

Tako se dobija da je razmjera preobražaja za dužine:

$$\frac{R_1}{R_2} = \sqrt[3]{\frac{M_1}{M_2}}$$

Ako se izabere taj odnos tako da je: $\frac{R_1}{R_2} = 2.5$ i posmatrana masa eksplozivnog punjenja izabere tako ako da je $M_1 = 1300$ gr dobija se da manje modelirano punjenje mora imati masu: $M_2 = \frac{1300}{2.5^3} = 83g$.

Iz praktičnih razloga (ista veličina detonatora za obje razmjere) modelirano manje punjenje je bilo mase $M_2 = 78g$ i imalo je prečnik od 57mm.

Ponovo treba napomenuti da, iako je umanjeno punjenje davalo isti najveći nadpritisak i brzinu dejstva udarnog talasa kao i veće punjenje od 1300 gr, vremensko trajanje pozitivnog dijela udarnog talasa, kao i vrijednost impulsa I kod većeg punjenja su bili dva puta veći nego kod umanjenog punjenja postavljenog na precizno određenom udaljenju.

5 Modeliranja ostvarenih ugiba

Ovo poglavlje prikazuje upoređenje ostvarenih (kvantifikovanih) pomjeranja kod manjih i većih uzoraka. Tablica 4 daje upoređenja nekih od karakterističnih rezultata.

Tablica 4. Ispitivanje pod udarnim opterećenjem - upoređenje ostvarenih pomjeranja

Udarno opterećenje od eksplozije		R.R. (%)
AB ploče razmjere 1:1	AB ploče razmjere 1:2.5	
LSE1: Udaljen. punjenja: 350mm Ostvarena pomjeranja: na 225mm od centra: 26.3mm, na 450mm od centra: 18.8mm. (Ove dvije pozicije korespondiraju udaljenjima od 90 i 180mm od centra na pločama u razmjeri 1:2.5)	Potrebno skalirano udaljenje punjenja: 140mm SE12 - Udaljenost punjenja: 150mm Ostvarena pomjeranja : na 80mm od centra : $\approx 21\text{mm}$ at 160mm od centra: $\approx 13\text{mm}$ at 240mm od centra : $\approx 7\text{mm}$ Procijenjeno pomjeranja na 90mm: $\approx 20\text{mm}$ Procijenjeno pomjeranja na 180mm: $\approx 11.5\text{mm}$	-
Procenat armiranosti ploče SE12 je bio značajno manji nego ploče LSE1, a manja ploča nije imala armaturu u gornjoj zoni u srednjem dijelu ploče. Iako je udaljenje punjenja koje je korišćeno u obije razmjere bilo gotovo u potpunosti u skladu sa zahtjevima modelske analize (pri čemu je skalirana udaljenost bila neznatno manja kod manje nego kod veće ploče) rezultati su, u skladu za zakonima modeliranja, takvi da se rezultati ne mogu direktno upoređivati.		
LSE2: Udaljen. punjenja: 250mm Ostvarena pomjeranja: na 225mm od centra: 31.9mm na 450mm od centra: 20mm	Potrebno skalirano udaljenje punjenja: 100mm SE5 - Udaljenost punjenja: 100mm Ostvarena pomjeranja: na 180mm od centra: 6.3mm	21.2%
Modelirana pomjeranja na 180mm od centra: $6.3 \times 2.5 = 15.75\text{mm}$ R.R. relativna razlika u pomjeranjima između dvije različite velič. modela: $R.R. = \frac{20 - 15.75}{20} = 0.212$		
LSE3 Udaljenost punjenja = 500mm Ostvarena pomjeranja: u centru: 52.2mm na 100mm od centra: 45.2mm na 200mm od centra: 38.9mm na 300mm od centra: 33.5mm	Potrebno skalirano udaljenje punjenja: 200mm SE11 - Udaljenost punjenja: 200mm Ostvarena pomjeranja: at 80mm od centra : $\approx 19\text{mm}$ Procijenjeno pomjeranje na 120mm od centra: $\approx 15\text{mm}$	22.1% 11.9%
Mjesta na kojima su izvršena mjerenja na "većoj" ploči odgovaraju centru i udaljenostima od 40, 80, i 120mm od centra na ploči razmjere 1:2.5.		
LSE5 Udaljenost punjenja = 200mm Ostvarena pomjeranja: at 300mm od centra: 38.2mm at 400mm od centra: 32.7mm at 500mm od centra: 23.4mm	Potrebno skalirano udaljenje punjenja: 80mm SE15 - Udaljenost punjenja: 75mm Ostvarena pomjeranja: na 80mm od centra : $\approx 18\text{mm}$ Procijenjeno pomjeranje na 120mm od centra: $\approx 15.6\text{mm}$ Procijenjeno pomjeranje na 160mm od centra: $\approx 13,2\text{mm}$ na 180mm : $\approx 12\text{mm}$ Procijenjeno pomjeranje na 200mm od centra: $\approx 9.8\text{mm}$	2.1% 0.9% 4.7%
Mjesta na kojima su izvršena mjerenja na "većoj" ploči odgovaraju udaljenostima od 120mm, 160mm i 200mm od centra na ploči razmjere 1:2.5.		

U tablici 4. relativna razlika u rezultatima (R.R) uključuje i grešku od modeliranja između dvije razmjere, ali, što se ne smije zaboraviti, i grešku uslijed uobičajenog rasipanja rezultata, koje je uvijek prisutno kod eksperimentalnih ispitivanja na elementima od armiranog betona, ali i na elementima od ostalih materijala.

Procijenjene vrijednosti iz tabela su dobijene metodama linearne interpolacije tj. linearne ekstrapolacije.

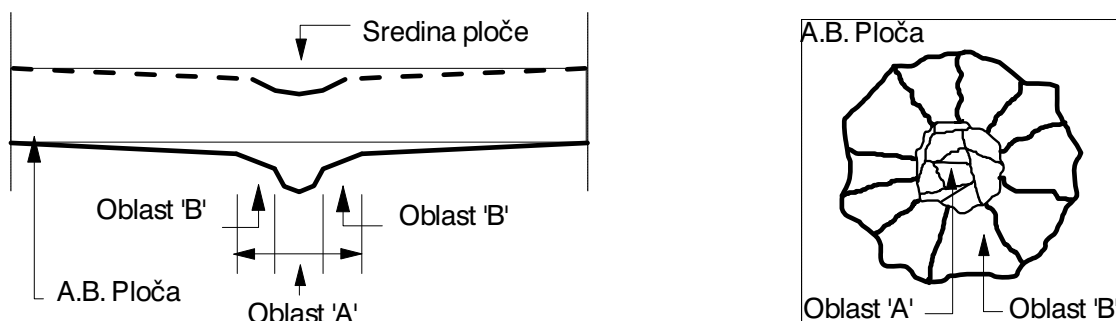
Prezentirani rezultati ukazuju da kada je globalni odgovor konstrukcije na savijanje dominantan (kao u slučaju ploča LSE5 i SE15) postižu se mnogo bolji rezultati u modeliranju pomjeranja, nego u situaciji kada je dominantan lokalni odgovor konstrukcije.

6 Modeliranje fizičkih oštećenja

Lokalni odgovor AB ploče na dejstvo udarnog talasa nastalog od eksplozivnog punjenja postavljenog na udaljenost 75mm od centra ploče karakteriše se inicijalnim formiranjem radijalnih pukotina na poledini ploče. Pored ovih radijalnih pukotina formira se i cijeli niz koncentričnih pukotina na donjoj strani ploče, već u ranoj fazi odgovora, slika 6., u uskoj oblasti poluprečnika oko 20 mm od mjesta epicentra. Ovo je kasnije praćeno formiranjem cijelog niza pukotina unutar ovako formirane oblasti.

Sledeći niz koncentričnih pukotina koji formira zarubljenu kupu smicanja stvara se na udaljenju od 126mm od centra, u blizini granice po kojoj će se kasnije beton "odvaliti" sa zadnje strane uzorka.

Stanje granične nosivosti, za ovakav lokalni odgovor konstruktivnog elementa na udarna opterećenja, manifestuje se značajnom ispucalošću i formiranjem kratera u oblasti oko epicentra na obje strane ploče, i moguće proboj, slika 6. Sve ove spoljne manifestacije loma uglavnom su direktna posledica prolaska naponskih talasa, prouzrokovanih impulsnim opterećenjem, kroz ploču. Pri tome, ne treba zanemariti da se dio oštećenja dešava i kao posledica ukupnog savijanja ploče, ili kao posledica lokalnog izbočavanja armature na mjestu najvećih uticaja. Kao posledica toga, konačan oblik ove ograničene oblasti formira se već na početku odgovora konstrukcije, dok se kasnije oštećenja samo eventualno uvećavaju, kroz fazu odgovora cijele konstrukcije na udarni talas.



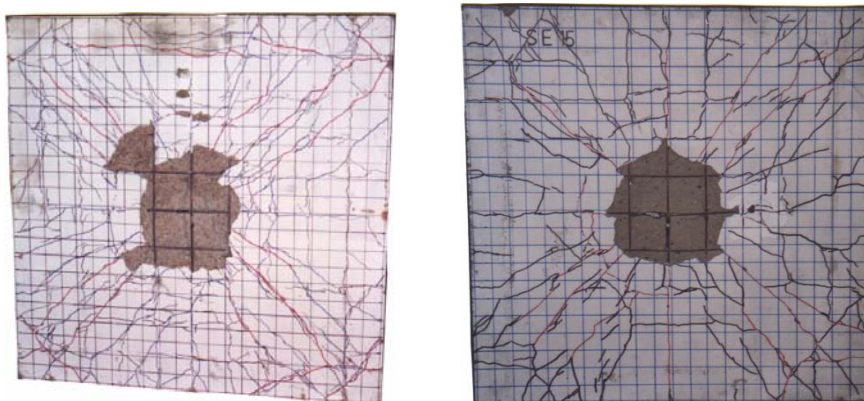
Slika 6. Simetrična ispucalost spoljnjeg prstena (prsten B) i nepravilna ispucalost unutrašnjeg prstena (prsten A)

Lokalna oštećenja su u kvantifikativnom smislu veoma slična u obje razmjere. Postignut je isti oblik "odvaljenog" betona na obje strane ploče, pri čemu su i mjerljiva oštećenja iz obje korišćene razmjere veoma slična i uporediva.

Tako na primjer, oštećenja na gornjoj (izloženoj) strani ploče su u obije razmjere veoma mala, dok su oštećenja na donjoj (unutrašnjoj, zaklonjenoj) strani ploče veoma značajna. Pored toga i veličina i oblik radijalnih i koncentričnih pukotina, koje su predhodno definisane, pokazuje veliko slaganje između dvije korišćene razmjere, na taj način potvrđujući i identičan mehanizam loma.

Kao primjer rečenog, koristeći sličnost ostvarenih opterećenja i poprečnih presjeka, izvršimo direktno upoređenje između oštećenja na velikoj ploči LSE5 i na maloj ploči SE15. Na početku konstatuje se da nijedna od njih nije doživjela proboj, oštećenja gornje strane neznatno su izraženija na većoj ploči, dok je procenat oštećenja zadnje strane ploče gotovo identičan. Pored toga, ispucalost gornje i donje strane ploče je gotovo identična. Sve predhodno je veoma indikativno i pokazuje izuzetno dobro primijenjene zakone modeliranja, posebno ako se uzme u obzir mala ploča SE 16 koja je bila izložena istoj količini eksploziva, na rastojanju koje je bilo samo 15mm manje nego kod SE15, ali je doživjela potpuno drugačiji mehanizam loma i oštećenja - uključujući i proboj.

Linije tečenja, koje se uobičajeno formiraju kod površinskih nosača ovog tipa, karakterišu oštećenja prouzrokovana savijanjem ispitivanih ploča pod udarnim opterećenjem, u obije razmjere. Ista vrsta pukotina pojavljuje se na površinama ploča obije razmjere, na taj način indicirajući postojanje identičnog odgovora, slika 7.



Slika 7. Tipična oštećenja (uključujući i pukotine) za ploče u dvije različite razmjere (ploča SE15 predstavlja model ploče LSE5, umanjen za 2.5 puta, a izložen modeliranom opterećenju)

Na predhodnoj slici je potpuno evidentno da su lokalni i globalni odgovor, manifestovan kroz oštećenja konstruktivnog elementa gotovo identičan na obije ploče, iako je ploča na desnoj strani 2.5 puta manja nego ploča na lijevoj strani. Čak što više, gotovo identičan oblik i veličina oštećenja na zadnjoj strani ploče u zoni epicentra ukazuju da je moguće kvalitetno modeliranje čak i takvih lokalnih pojava kao što je formiranje pukotina u ranoj fazi odgovora AB ploče.

Značajno je primijetiti da je modeliranje ovih lokalnih i globalnih oštećenja uzorka pod udarnim opterećenjem bilo uspješnije i kvalitetnije čak i od modeliranja ostvarenih ugiba uzorka.

7 Zaključak

Sledeći zaključci mogu biti izvučeni iz rezultata prezentiranih u ovom članku:

- Brojni problemi koji su povezani sa ispitivanjima konstrukcija i elemenata pod udarnim opterećenjima zahtijevaju prelazak sa prototipova na modele. Pri tome primjena adekvatnih modela je najprihvatljiviji način modeliranja ponašanja elemenata izloženih udarnom opterećenju.
- Zakoni modeliranja korišćeni u ovom ispitivanju mogu, kako je prikazano, biti uspješno korišćeni za modeliranje konstrukcija izloženih udarnom opterećenju. Zanemarivanjem uticaja gravitacije na dobijene rezultate se ne utiče u većom mjeri, dok zanemarivanje uticaja brzine deformisanja ispitivanih uzorka može biti od mnogo većeg značaja, posebno ako se radi o znatnim razlikama u brzinama.
- Modeliranje udarnih opterećenja od eksplozije primjenom principa kubnog korijena predstavlja pouzdan postupak, što se potvrdilo i na rezultatima prezentiranim u ovom članku.

LITERATURA

[1] Ross, T.J. i Krawinkler, H.: *Impulsive direct shear failure in RC slabs*, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 111, No. 8, Aug 1985.

[2] Kobayashi, A.S.: *Handbook on experimental mechanics*, 2-nd edition, Society of Experimental Mechanics, ISBN: 1560816406, 1993

[3] Sabnis, G.M. itd: *Structural modelling and experimental techniques*, Newark and Hall, Prantice-Hall, New-Jersey, USA, 1983.

[4] Noor, F.A. i Boswell, L.F.: *Small scale modelling of concrete structures*, Elsevier Applied Science, London, 1992.

[5] Henrych, J.: *The Dynamics Of Explosion and its use*, Elsevier Scientific Publishing Company, Oxford, 1979.