

Eksperimentalno modeliranje impulsom opterećenih armiranobetonskih ploča

Nebojša Đuranović

Ključne riječi

armiranobetonska ploča,
uvjeti sličnosti,
modeliranje,
impuls,
eksplozija,
progib,
oštećenje

N. Đuranović

Prethodno priopćenje

Eksperimentalno modeliranje impulsom opterećenih armiranobetonskih ploča

Prikazan je odgovarajući model sa zanemarenom silom zemljine teže, primijenjen za proučavanje odziva armiranobetonskih ploča na udarno opterećenje nastalo od eksplozije na maloj udaljenosti. Parametri udarnog vala modelirani su primjenom načela "kubnog korijena". Prikazani su uspoređeni rezultati dobiveni na modelima u dva različita mjerila. Pritom je promatrano modeliranje uzoraka, udarnog opterećenja, izmjerenih progiba te ostvarenih lokalnih i globalnih oštećenja uzorka.

Key words

reinforced-concrete slab,
similarity conditions,
modeling,
impulse,
explosion,
deflection, damage

N. Đuranović

Preliminary note

Experimental modeling of reinforced concrete slabs subjected to impulse load

The author presents an appropriate model, in which gravity is neglected, as applied in the study of response of reinforced-concrete slabs to impact load caused by explosions at small distances. Impact wave parameters are modeled using the "cubic root" principle. Comparative results obtained on models made in two different scales are presented. At that, the following parameters were observed: sample modeling, impact load, deflection, and local and global sample damage.

Mots clés

dalle en béton armé,
conditions de similarité,
modélisation,
impulsion,
explosion,
flèche,
dégradation

N. Đuranović

Note préliminaire

Modélisation expérimentale des dalles en béton armé soumises aux charges impulsives

L'article présente un modèle approprié, dans lequel la pesanteur est négligée, utilisé pour l'étude de la réponse des dalles en béton armé à la charge de choc créée par une explosion à faible distance. Les paramètres de l'onde de choc ont été modélisés selon le principe de la « racine cubique ». On présente les résultats comparatifs obtenus sur les modèles à deux échelles différentes. Lors des essais, on observait la modélisation des échantillons, de la charge de choc, des flèches mesurées, ainsi que les dégradations locales et globales des échantillons.

Ключевые слова

железобетонная плита,
условия подобности,
моделирование,
импульс, взрыв,
прогиб,
повреждение

Н. Джуранович

Предварительное сообщение

Экспериментальное моделирование импульсом нагруженных железобетонных плит

В работе показана соответствующая модель с непринимаемой во внимание силой тяжести, применённая для изучения ответа железобетонных плит на ударную нагрузку, возникающую от взрыва на малой удалённости. Параметры ударной волны моделированы применением принципа "кубического корня". В работе показаны сравнительные результаты, полученные на моделях в двух различных масштабах. Пritom велось наблюдение над моделированием образцов, ударной нагрузкой, измеренными прогибами и осуществлёнными местными и глобальными повреждениями образца.

Schlüsselworte

Stahlbetonplatte,
Ähnlichkeitsbedingungen,
Modellieren,
Impuls, Explosion,
Durchbiegung,
Beschädigung

N. Đuranović

Vorherige Mitteilung

Experimentales Modellieren impulsbelasteter Stahlbetonplatten

Dargestellt ist ein entsprechendes Modell mit Unterlassung der Schwerkraft der Erde, angewendet für die Erforschung des Widerhalls von Stahlbetonplatten auf die durch eine Explosion in geringer Entfernung verursachte Schlagbelastung. Die Parameter der Schlagwelle wurden unter Anwendung des Prinzips der "Kubikwurzel" modelliert. Dargestellt ist der Vergleich der an Modellen in zwei verschiedenen Maßstäben gewonnenen Ergebnisse. Dabei betrachtete man das Modellieren der Probestücke, der Schlagbelastung, der gemessenen Durchbiegungen und der entstandenen lokalen und globalen Beschädigungen des Probestücks.

Autor: Doc. dr. sc. **Nebojša Đuranović**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Univerziteta Crne Gore, Podgorica

1 Uvod

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

Među potencijalnim problemima, zbog kojih se ispitivanja pod udarnim opterećenjem i ubraja u kategoriju najkompliciranijih eksperimenata, nalaze se i:

- neophodno posjedovanje adekvatne mjerne opreme, pri čemu se razmatra brzina i kratkoća djelovanja nanesenog opterećenja
- neophodno posjedovanje pouzdanog i izdržljivog sustava za prikupljanje podataka, koji također u pojedinim situacijama može biti izložen udarnom valu
- problemi povezani s dimenzioniranjem i potom eventualnim modeliranjem udarnog vala koji zadovoljava namjenu eksperimenta
- osiguranje nepomičnosti referentnog sustava u odnosu na koji se vrše mjerenja
- fizičko osiguranje osoblja i opreme prije, tokom i nakon izvršenog ispitivanja
- osiguranje okolnog prostora od posljedica nanošenja opterećenja na ispitivani uzorak.

Opterećenja udarnim valom eksplozije moguća su, osim onih koja nastaju kao posljedica sračunatih i prethodno planiranih terorističkih ili vojnih akcija i zbog cijelog niza drugih aktivnosti. Na primjer tijekom skladištenja, transporta i proizvodnje eksplozivnih i jako zapaljivih tvari, u kemijskoj i petrokemijskoj industriji, zbog popuštanja kontejnera pod tlakom eksplozija plinskih boca, eksplozija plina koji se može nagomilati uslijed dotrajalosti i oštećenja na plinovodima i u mnogim drugim sličnim situacijama.

Kada se eksplozija dogodi u neposrednoj blizini armiranobetonskog elementa, rezultirajuća se opterećenja nanose prvo u najbližem, vrlo ograničenom području elementa, epicentru, a onda se nastavljaju mijenjati s vremenom i udaljenošću po površini elementa i to kao posljedica značajne zakrivljenosti udarnog vala eksplozije. Rezultat toga jest ponašanje koje se obično dijeli na lokalni i globalni odziv konstrukcije s različitim vremenima pojavljivanja.

Lokalni se odziv u osnovi karakterizira razvojem centralne zone posmika, koji je u obliku krnjeg stošca: (*shear plug*)

[1], pri čemu se sva značajnija oštećenja i deformacije nalaze u neposrednoj blizini epicentra eksplozije ili udarne sile.

2 Primijenjena načela modeliranja

Model u ispitivanju konstrukcija obično se definira kao konstrukcijski element ili konstrukcija izvedena u umanjenom mjerilu u odnosu na stvarnu veličinu, koji se izlažu modeliranim opterećenjima radi dobivanja rezultata koji mogu definirati ponašanje stvarne konstrukcije ili konstrukcijskog elementa (prototipa). Pri tome oni moraju biti izrađeni u skladu sa zahtjevima teorije sličnosti modela i prototipa, kako bi se rezultati s modela mogli na kvalitetan način primijeniti na prototip.

U tom smislu, pod pojmom modeliranja podrazumijeva se proces analiziranja određenih pojava, parametara i veličina na stvarnoj inženjerskoj konstrukciji – prototipu, njihovim uspoređivanjem s pojavama, parametrima i veličinama koje su registrirane, kvantificirane i objašnjene ispitivanjem modela te stvarne konstrukcije. Modeliranje je danas toliko teoretski i praktično potkrijepljeno dokazima i primjerima da se iz rezultata ispitivanja na modelima može steći potpun uvid u ponašanje, tj. odziv stvarne konstrukcije za zadata opterećenja i promatrane parametre ponašanja (kao što su progibi, pomaci, deformacije, rotacije, naprezanja, nosivosti, oštećenja itd.), koji se mogu potpuno pouzdano odrediti ispitivanjem modela, umjesto ispitivanja stvarne konstrukcije.

Da bismo mogli upotrebljavati modele pri eksperimentalnom ispitivanju konstrukcija, neophodno je prethodno jasno definirati matematičke veze između modela i prototipa. Ove se veze nazivaju uvjetima sličnosti, pravilima za modeliranje ili uvjetima modelske analize, a određuju se načelima sličnosti.

Postupak modeliranja sprovodi se na osnovi određenih načela koja 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. Ova načela i njihovi kvantifikacijski parametri (veličine koje se mjere) značajni su pri uspostavljanju odnosa koji vrijede 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 dimenzijske analize fizičkih pojava koje karakteriziraju ponašanje promatrane konstrukcije. U tom smislu, da bi bili ispunjeni zahtjevi dimenzijske analize pri modeliranju konstrukcija potrebno je zadovoljiti njena dva osnovna postulata, koji glase:

- Odnos vrijednosti dva slična, usporediva, parametra (veličine koje mjerimo) potpuno je neovisan o

jedinicama u kojima su one izražene. Rečeno na drugi način: odnos dviju sličnih veličina neovisan je o primijenjenim jedinicama za njihovo mjerenje, pod uvjetom da su obje pri uspoređivanju mjerene istim jedinicama.

- Oblik jednadžbe, kojom se kvantificira određena pojava, neovisan je o veličini jedinica u kojima se mjerena veličina izražava. Rečeno na drugi način: matematička veza (jednadžba) koja opisuje ponašanje konstrukcije mora biti dimenzijski ispravna i nakon prijelaza s prototipa na model, bez obzira na promatrane parametre ponašanja (npr. naprezanje, deformacija, progib itd.) koji kvantificiraju efekte odziva konstrukcije.

Prvi postulat kaže da ako su, primjerice [2] duljina i širina promatranog elementa 3 m i 1 m, onda je odnos duljine i širine jednak 3 bez obzira u kojim se mjernim jedinicama mjeri tj. odnos je isti ako mjerimo metrima, inčima ili pedljima itd.

Drugi postulat kaže da ako se, primjerice, normalno naprezanje σ za presjek površine A opterećen uzdužnom silom P određuje jednadžbom $\sigma = P/A$, pri modeliranju ta jednadžba mora vrijediti bez obzira na jedinice koje izaberemo za P tj. A (kN, metre, feete, inče itd.). Jednadžbe koje zadovoljavaju ovaj uvjet nazivamo kompletnim jednadžbama. Takve nisu jednadžbe koje recimo imaju koeficijente koji nisu bezdimenzijski - 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 prethodne veličine. Takve se jednadžbe ne mogu neposredno modelirati.

Fundamentalne veličine koje se upotrebljavaju pri dimenzijskoj analizi su: duljina, vrijeme, sila (ili masa), temperatura i električno punjenje. Pri modeliranju u građevinarstvu, gdje su problemi u osnovi mehaničke prirode, svakako su najbitnije prve tri veličine.

Direktna je posljedica drugog postulata dimenzijske analize i Buckinghamov π -teorem. On kaže da se jednadžba sa k varijabli X , ako se radi o kompletnoj jednadžbi, može izraziti kao veza sa $k - r$ neovisnih bezdimenzijskih veličina π , gdje je r broj osnovnih dimenzija potrebnih da opišu varijable u početnoj (kompletnoj) jednadžbi. To praktički znači da se broj varijabli u jednadžbi koja opisuje određenu pojavu može smanjiti za najviše onoliko nepoznanica koliko imamo osnovnih, tj. fundamentalnih varijabli koje opisuju promatranu pojavu.

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

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

može izraziti kao bezdimenzijska veza (jednadžba):

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

gdje su π_1 do π_k bezdimenzijski parametri ponašanja konstrukcije, koji su prethodno bili dani u uobičajenom obliku fizičkim veličinama X_1 do X_k . (tj. naprezanja, duljine, ubrzanja itd.).

Kako je prethodno rečeno, ova transformacija omogućava redukciju broja nepoznatih parametara n koji u potpunosti definiraju 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 promatrane konstrukcije. To znači da, recimo, problem iz područja dinamike konstrukcija, koji je definiran jednadžbom s na pr. $n = 6$ parametara, može biti smanjen pri modeliranju, tj. pri određivanju odnosa parametara ponašanja (kao što su npr. naprezanje, sila, deformacija itd.) između prototipa i modela, na samo 3 parametra, jer je broj fundamentalnih veličina $r = 3$ (duljina, vrijeme i masa).

Ovi se G (bezdimenzijski) izrazi zovu projektne jednadžbe. One se pišu i za prototip i za model i u načelu su potpuno identične, samo kod jednih je oznaka p - prototip, a kod drugih oznaka m - model. Kada se projektne jednadžbe za model i za prototip podijele, dobiva se jednadžba predviđanja.

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

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

Kako je obično vrlo teško uspostaviti potpunu sličnost prototipa i modela, često se ide na *adekvatne modele (djelomična sličnost)*, koji imaju znatnu sličnost sa prototipom, pri čemu oni eliminiraju (ne razmatraju) one parametre ponašanja koji nisu bitni za odziv konstrukcije. Znači, ako pojedini bezdimenzijski odnosi iz modela i prototipa nisu zadovoljeni, tj. može se naći makar jedan za koji vrijedi:

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

tada imamo adekvatni model, tj. djelomičnu sličnost. Pri tome bezdimenzijski faktor koji nije zadovoljen ne smije utjecati na parametar, tj. indikator ponašanja koji se promatra.

Na primjer, ako se promatra problem modeliranja ukupnih progiba grede (i od savijanja, i od posmika) tada je

nužno zadovoljiti bezdimenzijske veze po širini grede modela i prototipa i bezdimenzijske veze po visini grede modela i prototipa [2]. Međutim, ako se razmatra dio progiba koji je posljedica samo momenata savijanja, tada u izrazima za progib ne postoje odvojeno širina i visina grede, već samo moment tromosti presjeka pa i uvjete sličnosti možemo ostvarivati poštujući samo odnose momenata inercije modela i prototipa, pri čemu uvjeti 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 uvjet koji se traži postojanje zahtijevane sličnosti između momenata inercije prototipa i modela. Takav model, koji daje točne rezultate samo za određene segmente ponašanja, zove se adekvatni model ili model koji ima djelomičnu sličnost.

Na kraju, kada se moraju zanemariti vrlo značajni parametri koji direktno utječu na rezultate ispitivanja čak i za izdvojeni problem, kaže se da imamo tzv. poremećene modele ili izobličenu sličnost.

Razmatranje parametara modeliranja kod udarnih opterećenja uključuje modeliranje funkcije opterećenja (sila, naprezanje, vrijeme, ubrzanje, gravitacija), geometriju uzorka koji se ispituje (geometrijske dimenzije, pomaci i deformacije) i karakteristike materijala (modul elastičnosti, Poissonov koeficijent, specifičnu težinu i gustoću).

Pristup pri kojem bismo imali potpunu sličnost konstrukcije (prototipa) i modela zahtijeva izbor tri parametra ponašanja (mjerene, tj. promatrane veličine) za koje se mogu izabrati neovisne veličine mjerila [3, 4]. Pritom, mogu biti izabrane samo tri takve veličine, zato što postoje samo tri neovisne fundamentalne veličine (duljina, masa (sila) i vrijeme), čijim kombinacijama je potpuno definirano ponašanje promatranog elementa. Kako u svim mogućim kombinacijama nabrojanih parametara ponašanja kod dinamičkih opterećenja (osim u vrlo rijetkim i specijalnim laboratorijskim uvjetima u kojima se kontrolira i gravitacija zemlje) ubrzanje zemljine teže mora biti jednako i za prototip i za model (mjerilo $R_g = 1$), ostaju samo dva neovisna parametra čije mjerilo iz prototipa i modela možemo izabrati proizvoljno. Kao takve neovisne parametre možemo primjerice, izabrati mjerila Poissonova koeficijenta ν i brzinu V . Posljedica prethodnog izbora triju veličina, čija smo mjerila odredili neovisno, a da bi se ispunili uvjeti dimenzijske analize pri potpunoj sličnosti za ostale promatrane veličine, je da dolazimo do situacije gdje su vrijeme, duljine i pomaci modelirani mjerilom konstantnih faktora, a deformacije, gravitacija, Poissonov koeficijent i brzina bili bi isti za prototip i za model. Međutim, nažalost, u takvoj situaciji, modeliranje mase, gustoće, sile i naprezanja zahtijevalo bi 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 je slučaju vrlo otežana.

Model koji bi trebalo upotrijebiti, a koji se pokazao najkvalitetnijim za modeliranja ovakve vrste opterećenja i pojava, jest onaj gdje imamo iste mehaničke karakteristike materijala u modelu i prototipu i potpunu sličnost geometrije prototipa i modela (znači linearno smanjenje modela u odnosu na prototip). Jedan od mogućih adekvatnih modela koji zadovoljava ove uvjete zove se model sa zanemarenom gravitacijom (*Gravity Forces Neglected Model*). Njegova je glavna razlika u odnosu na model potpune sličnosti, kako mu i ime kaže, da je zanemaren utjecaj gravitacijskog ubrzanja. Ovo pojednostavnjenje unosi zanemarivu grešku pri modeliranju, budući da gravitacijske sile ne predstavljaju značajan dio opterećenja kod ispitivanja udarom ili eksplozijom. Za ovaj adekvatni model veze parametara iz prototipa i modela, njihovim mjerilima, izračunane su i prikazane u tablici 1, pri čemu R_l predstavlja usvojeni linearni faktor mjerila, a "1" znači da je mjerilo između prototipa i modela jednako jedinici, tj. $R = 1$. S , L i T predstavljaju jedinice sile, duljine i vremena.

Osim toga, treba reći da je u ovom radu prikazano adekvatno modeliranje koje praktički ne uzima u obzir efekte brzine deformiranja uzorka pod udarnim opterećenjem (za uspoređenja s uzorcima druge veličine koji su također izloženi udarnom opterećenju), niti, što smo vidjeli, utjecaje gravitacije, već se oni smatraju zanemarivim.

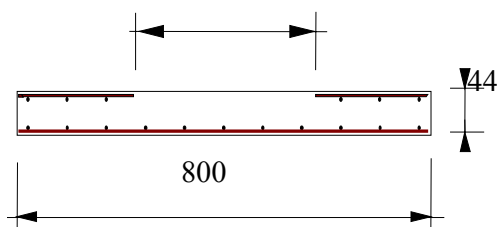
Tablica 1. Mjerila između parametara ponašanja prototipa i modela pri modeliranju udarnog opterećenja po načelima zanemarenja gravitacijskog ubrzanja

Parametri ponašanja	Jedinica	Mjerilo
sila	S	R_l^2
tlak	SL^{-2}	1
vrijeme	T	R_l
ubrzanje gravitacije	LT^{-2}	zanemareno
brzina	LT^{-1}	1
geometrijske duljine	L	R_l
progibi (pomaci)	L	R_l
deformacija	-	1
modul elastičnosti	SL^{-2}	1
naprezanje	SL^{-2}	1
poissonov koeficijent	-	1
gustoća	ST^2L^{-4}	1

3 Geometrijski linearno modeliranje uzoraka i sastavnih materijala

Armiranobetonske ploče, pravokutnog poprečnog presjeka i kvadratne osnove, koje su upotrijebljene u ovom istraživanju, osnovane su na tipičnim konstrukcijskim elementima ovoga tipa koji se mogu naći u različitim vrstama građevina. Modeli su tako definirani da predstavljaju približno $R = 1:4$ i $R = 1:10$ umanjena tipičnih ploča. Znači, male ploče (oznake SE) modeliraju veće ploče (oznake LSE) u mjerilu 1:2,5.

Dimenzije manjeg modela uzorka dane su na slici 1. Sve četiri strane ploče imale su identične uvjete oslanjanja, koji su potpuno onemogućavali horizontalne i vertikalne pomake i, gotovo u potpunosti, rotacije zona oslanjanja ploče.



Mrežasta armatura $\varnothing 3,15$ mm na svakih 76,2 mm
Zaštitni sloj betona: 4 mm

Slika 1. Poprečni presjek manjeg modela armiranobetonske ploče

Pri ispitivanju, a u skladu sa prethodno rečenim, beton koji se primjenjivo za armiranobetonske ploče u oba mjerila bio je istih mehaničkih karakteristika. Da bi se to postiglo, prethodno su se pažljivo ispitivale betonske mješavine, čime je ustanovljeno da se najbolji rezultati dobivaju ako se za najveće zrno agregata kod umanjenog modela, u mjerilu 1:2,5, usvoji isto osnovno mjerilo koje pokazuje odnos geometrijskih dimenzija prototipa i modela.

Tako je agregat koji je upotrebljavan u uzorcima većih ploča (ploče dimenzija 2×2 m, $R = 4$) bio riječni agregat najvećeg zrna 10 mm, dok je kod modela malih ploča (ploče dimenzija $0,8 \times 0,8$ m, $R = 10$), kao agregat upotrijebljen lagano isprani riječni pijesak, najveće veličine zrna od 4 mm.

Težinski odnosi upotrijebljene betonske mješavine za oba korištena mjerila modela su prikazani u Pritom je upotrijebljena ista vrsta cementa. Prosječna ostvarena tablici 2. čvrstoća betona na tlak ovih mješavina bila je reda veličine oko 40 MPa.

Tablica 2. Mješavine upotrijebljene za armiranobetonske ploče

Vrste mješavine	cement	pijesak	šljunak	voda
mikrobetonska	1	3	-	0,6
makrobetonska	1	2.28	3	0.6

Gotovo identičan postotak armiranosti modela i prototipa, koji predstavlja jedan od osnovnih zahtjeva linearnoga geometrijskog modeliranja, najefikasnije se mogao postići na način, primijenjen i u ovom ispitivanju, da su i razmak armaturnih šipki i veličina promjera šipki u manjem modelu bili umanjeni u odnosu na veći model za manjeviše istu vrijednost usvojena geometrijska mjerila $R_1 = 2,5$.

Pri tome, radi jednostavnosti izrade armaturnih koševa, kod manjih modela rabljene su gotove mreže, koje su imale promjer šipki 3,15 mm i njihov je razmak u oba smjera bio 76,2 mm. Konačno, ova je mreža imala nosivost na vlak oko 113% od tražene, ali, što je također bilo uzeto u razmatranje, razmak šipki je bio 95% od potrebnog. Sami postoci armiranja, i glavni parametar funkcije opterećenja-udaljenosti na kojima se nalazilo eksplozivno punjenje, za uzorke koji će se razmatrati u ovom tekstu, prikazani su u tablici 3.

Tablica 3. Osnovni podaci o izvršenim testovima

Vrste mode	Oznaka ploče	Udaljenost punjenja [mm]	Vlačna 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 %

Eksplozivna punjenja upotrijebljena u ovim ispitivanjima bila su napravljena od PE4 koji ima obujamsku masu 1590 kg/m^3 , tlak 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 polukugle, promjera 57 mm sa zakrivljenom stranom okrenutom prema uzorku. U svim testovima punjenja su inicirana s ravne strane, pri čemu je težina punjenja za manje modele armiranobetonskih ploča uvijek bila 78 g. Udarni val nastao zbog eksplozije PE4 putovat će na malim udaljenostima brzinom od 7500 m/s [5].

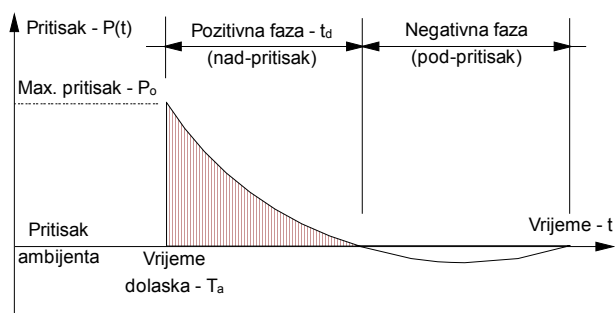
Razmak punjenja od uzorka definiran je kao čisti razmak među njima. Svi su testovi izvedeni u (sa gornje strane) otvorenom prostoru, koji je bio oblika pravokutnika, dimenzija 5×2 m, visine zida 2,5 m, izgrađen od betonskih blokova, s betonskim podom.

4 Modeliranje funkcije opterećenja

Da bi se utvrdila mogućnost modeliranja, potrebno je prethodno definirati glavne parametre eksplozivnog opterećenja, jer definiranje funkcije opterećenja ploče samo

po sebi ima prvorazredno značenje sa stajališta analize rezultata testova.

Eksplzivni val, kao izvor dinamičkog opterećenja na konstrukciji, kvantificira se uz pomoć nekoliko osnovnih parametara. To su maksimalni nivo nadtlaka P_o udarnog vala eksplozije, vrijeme dolaska eksplozivnog vala T_a , vremensko trajanje faze nadtlaka t_d i vremensko trajanje faze podtlaka. Svi su oni grafički predstavljeni na slici 2.

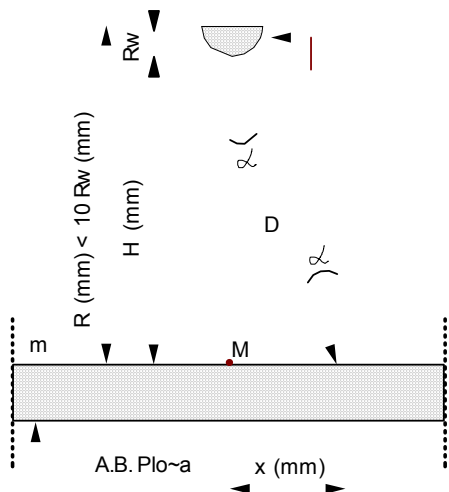


Slika 2. Parametri opterećenja od eksplozivnog vala

Osim ovih osnovnih parametara, značajno je spomenuti i impuls I udarnog vala:

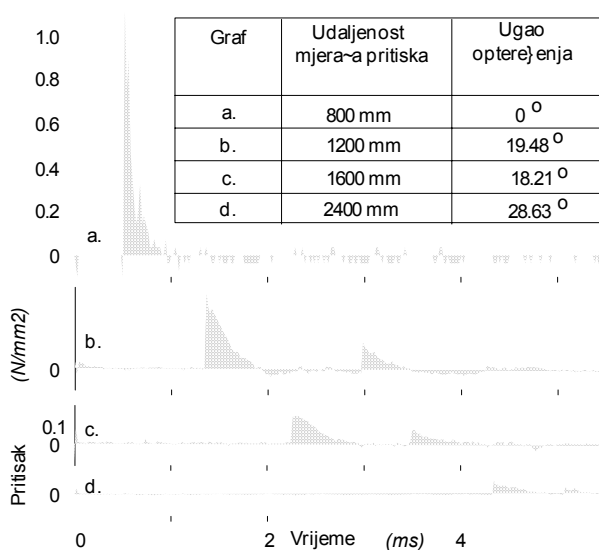
$$I^+ = \int_{T_a}^{t_d} P \cdot t$$

Slučaj kada je $R_w < \geq 10 R_w$, pri čemu je R_w polumjer eksplozivnog punjenja, a α udaljenost do njegovog središta (slika 3.), smatra se bliskom ili eksplozijom u blizini konstrukcije. Sva istraživanja ovdje izložena pripadaju toj kategoriji opterećenja.



Slika 3. Utjecajni faktori funkcije opterećenja

Tipični rezultat mjerenja ostvarenih opterećenja jednog od testova na manjim uzorcima prikazan je na slici 4.



Slika 4. Tipični dijagram tlak/vrijeme za punjenje od 78g

Pravila modeliranja vala impulsnog opterećenja osnovana su na očuvanju početne energije i geometrijskoj sličnosti. Geometrijska sličnost trodimenzionalnih tijela (poput eksplozivnog punjenja koje se modelira) vodi do načela modeliranja s pomoću "kubičnog korijena" (*cube root scaling laws*), koja se danas najčešće i rabe za modeliranje djelovanja impulsnih valova. Sva modeliranja veličina eksplozivnog punjenja i njegove udaljenosti od uzorka u slučaju ispitivanja predstavljenih u ovom članku, bazirani su na pravilu "kubičnog korijena". Osim toga, a uzimajući u obzir činjenicu da je eksploziv TNT praktički svuda prihvaćen kao jedinica mjere različitih karakteristika udarnog vala, i na ovom mjestu će se za opis procesa modeliranja oslobođene energije i ostalih parametara udarnog vala upotrebljavati jedinica od 1 kg TNT eksploziva, pri čemu se uspoređenja daju u odnosu na sferično punjenje od dane količine eksploziva.

Prema pravilima koja vrijede za modeliranje s pomoću "kubičnog korijena", dvije će eksplozije proizvesti identične udarne valove na udaljenostima koja su proporcionalna kubičnom korijenu njihovih oslobođenih energija, koje se uzimaju kao glavni kontrolni parametar. Očuvanje energije uvodi se kroz promatranje gustoće atmosferskog omotača, koja predstavlja mjeru mase zraka, što nas dovodi do konačnog izraza za modelirane udaljenosti Z punjenja od promatrane točke na konstrukciji. Ta je duljina:

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

gdje je:

f_d - bezdimenzijski odnos gustoće atmosfere kroz koju udarni val putuje i gustoće atmosfere kod referentnog udarnog vala (eksplozije).

W - masa eksploziva (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 tlaka na udaljenostima od središta punjenja:

$$R_1 = k \cdot R_2$$

gdje je:

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

Međutim, treba obratiti pažnju na činjenicu da iako će najveći nivo tlaka u promatranoj točki - a koji je jedan od glavnih mjera udarnog vala - na udaljenostima R_1 i R_2 biti isti, nemogućnost skaliranja vremenske komponente znači da ostali važni parametri udarnog vala, poput duljine trajanja pozitivnog dijela udarnog vala T_d i njegovog impulsa I , neće biti isti. Može se pokazati da će oni biti:

$$I_1 = k \cdot I_2 \quad \text{tj.} \quad T_{d1} = k \cdot T_{d2}$$

Pri prethodnim razmatranjima promatrana su identična atmosferska okruženja referentne i promatrane eksplozije. U slučaju da to nije tako, svi prethodno dani izrazi moraju biti u određenoj mjeri korigirani, zbog različitih gustoća i temperatura zraka.

Osim nekoliko početnih ispitivanja (koja nisu ovdje ni prezentirana) kada su punjenja bila u obliku cilindra, u svim ostalim testovima primijenjena 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, gustoće i težine punjenja. Za potrebe detoniranja ovako napravljenih punjenja tijekom ovih eksperimenata iskorišteni su izuzetno precizni L2A1 detonatori (vrijeme kašnjenja do 0,2 msec) koji su bili postavljeni u prethodno formirane 10 mm duboke rupe u središtu ravne strane polusferičnog punjenja. Upotrebom izolacijske trake i ležišta formiranih od stiropora, ovako formirana punjenja su bila pričvršćivana na propisana mjesta i udaljenosti od ispitivanih uzoraka.

Punjenja za testove u većem mjerilu bila su mase 1300 g, pri čemu je ta težina definirana prema prostorijski gdje je obavljeno ispitivanje a koja je bila atestirana za te količine eksploziva. Promjer toga većega modeliranog punjenja bio je 142,5 mm.

Prethodno objašnjeno modeliranje principima kubičnog korijena pokazuje da će eksplozivno punjenje M_1 od 1300 g proizvesti isti nadtlak i brzinu udarnog vala 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 uvjet da je:

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

Tako se dobiva da je mjerilo pretvorbe za duljine:

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

Ako se izabere taj odnos tako da je $\frac{R_1}{R_2} = 2,5$ i promat-

rana masa eksplozivnog punjenja izabere tako ako da je $M_1 = 1300$ g, dobiva se da manje modelirano punjenje mora imati masu $M_2 = \frac{1300}{2,5^3} = 83$ g.

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

Ponovo treba napomenuti da iako je umanjeno punjenje davalo isti najveći nadtlak i brzinu djelovanja udarnog vala kao i veće punjenje od 1300 g, vremensko trajanje pozitivnog dijela udarnog vala i vrijednost impulsa I kod većeg punjenja bili su dva puta veći nego kod umanjeno punjenja postavljenog na precizno određenoj udaljenosti.

5 Modeliranja ostvarenih progiba

U ovom se poglavlju uspoređuju ostvoreni (kvantificirani) pomaci kod manjih i većih uzoraka. U tablici 4. uspoređuju se neki karakteristični rezultati.

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

Procijenjene su vrijednosti iz tablica dobivene metodama linearne interpolacije, tj. linearne ekstrapolacije.

Prikazani rezultati pokazuju da kada je globalni odziv konstrukcije na savijanje dominantan (kao u slučaju ploča LSE5 i SE15) postižu se mnogo bolji rezultati u modeliranju pomaka, nego u situaciji kada je dominantan lokalni odziv konstrukcije.

6 Modeliranje fizičkih oštećenja

Lokalni odziv armiranobetonske ploče na djelovanje udarnog vala nastalog od eksplozivnog punjenja postavljenog na udaljenost 75 mm od centra ploče karakterizira se inicijalnim formiranjem radijalnih pukotina na donjoj strani ploče. Pored ovih radijalnih pukotina formira se i cijeli niz koncentričnih pukotina na donjoj strani ploče, već u ranoj fazi odziva, slika 5., u uskom području

Tablica 4. Ispitivanje pod udarnim opterećenjem - uspoređenje ostvarenih pomaka

Armiranobetonske ploče mjerila 1:1	Armiranobetonske ploče mjerila 1:2.5	R.R. [%]
LSE1: Udaljen. punjenja: 350 mm Ostvareni pomaci: na 225 mm od centra: 26,3 mm, na 450 mm od centra: 18,8 mm. (Ove dvije pozicije korespondiraju udaljenostima od 90 i 180 mm od centra na pločama u mjerilu 1:2,5)	Potrebna skalirana udaljenost punjenja: 140 mm SE12 - Udaljenost punjenja: 150 mm Ostvareni pomaci: na 80 mm od centra : ≈ 21 mm at 160 mm od centra: $\square 13$ mm at 240 mm od centra : $\square 7$ mm Procijenjeni pomaci na 90 mm: $\square 20$ mm Procijenjeni pomaci na 180 mm: $\square 11.5$ mm	-
Postotak 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 udaljenost punjenja koje je korišteno u oba mjerila 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 uspoređivati.		
LSE2: Udaljen. punjenja: 250 mm Ostvareni pomaci: na 225 mm od centra: 31,9 mm na 450 mm od centra: 20 mm	Potrebna skalirana udaljenost punjenja: 100 mm SE5 - Udaljenost punjenja: 100 mm Ostvareni pomaci: na 180mm od centra: 6,3 mm	21,2%
Modelirani pomaci na 180mm od centra: $6,3 \times 2,5 = 15,75$ mm		
R.R. relativna razlika u pomacima između dvije različite velič. modela: $R.R. = \frac{20 - 15.75}{20} = 0.212$		
LSE3 Udaljenost punjenja = 500 mm Ostvareni pomaci: u centru: 52,2 mm na 100mm od centra: 45,2 mm na 200mm od centra: 38,9 mm na 300mm od centra: 33,5 mm	Potrebna skalirana udaljenost punjenja: 200 mm SE11 - Udaljenost punjenja: 200 mm Ostvareni pomaci: at 80mm od centra : $\square 19$ mm Procijenjeni pomak na 120 mm od centra: $\square 15$ mm	22,1% 11,9%
Mjesta na kojima su izvršena mjerenja na "većoj" ploči odgovaraju centru i udaljenostima od 40, 80, i 120 mm od centra na ploči mjerila 1:2.5.		
LSE5 Udaljenost punjenja = 200mm Ostvareni pomaci: at 300mm od centra: 38.2 mm at 400mm od centra: 32,7 mm at 500mm od centra: 23.4 mm	Potrebna skalirana udaljenost punjenja: 80 mm SE15 - Udaljenost punjenja: 75 mm Ostvareni pomaci: na 80 mm od centra : $\square 18$ mm Procijenjeni pomak na 120 mm od centra: $\square 15,6$ mm Procijenjeni pomak na 160 mm od centra: $\square 13,2$ mm na 180 mm : $\square 12$ mm Procijenjeni pomak na 200 mm od centra: $\square 9.8$ mm	2,1% 0,9% 4,7%
Mjesta na kojima su izvršena mjerenja na "većoj" ploči odgovaraju udaljenostima od 120 mm, 160 mm i 200 mm od centra na ploči mjerila 1:2.5.		

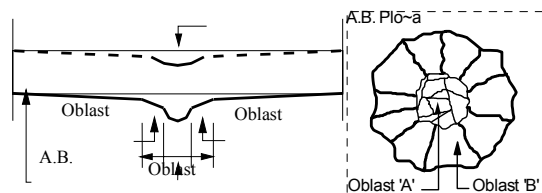
ju polumjera oko 20 mm od mjesta epicentra. Ovo je kasnije praćeno formiranjem cijelog niza pukotina unutar ovako formiranog područja.

Slijedeći niz koncentričnih pukotina koji formira krnji stožac posmika stvara se na udaljenosti od 126 mm od centra, u blizini granice po kojoj će se kasnije beton odlomiti sa zadnje strane uzorka.

Stanje granične nosivosti, za ovakav lokalni odziv konstrukcijskog elementa na udarna opterećenja, manifestira

se značajnom ispucalošću i formiranjem kratera u području oko epicentra na obje strane ploče i mogući proboj, slika 5. Sve ove vanjske manifestacije sloma uglavnom su direktna posljedica prolaska naponskih valova, uzrokovanih impulsnim opterećenjem, kroz ploču. Pritom, ne treba zanemariti da se dio oštećenja događa i kao posljedica ukupnog savijanja ploče, ili kao posljedica lokalnog izbočivanja armature na mjestu najvećih utjecaja. Kao posljedica toga, konačan oblik ovog ograničenog područja formira se već na početku odziva konstrukcije, dok se

kasnije oštećenja samo eventualno uvećavaju kroz fazu odziva cijele konstrukcije na udarni val.



Slika 5. Simetrična ispucanost vanjskog prstena (prsten B) i nepravilna ispucanost unutrašnjeg prstena (prsten A)

Lokalna su oštećenja u kvantifikacijskom smislu vrlo slična u oba mjerila. Postignut je isti oblik odlomljenog betona na obje strane ploče, pri čemu su i mjerljiva oštećenja iz oba mjerila vrlo slična i usporediva.

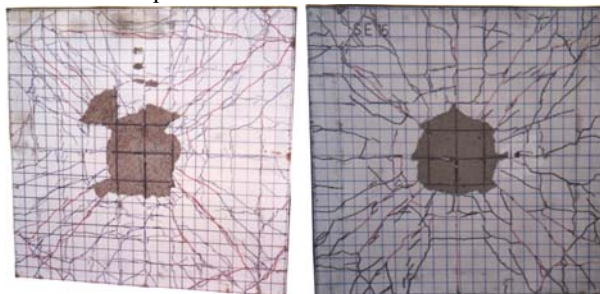
Tako su na primjer oštećenja na gornjoj (izloženoj) strani ploče u oba mjerila vrlo mala, dok su oštećenja na donjoj (unutrašnjoj, zaklonjenoj) strani ploče vrlo značajna. Osim toga i veličina i oblik radijalnih i koncentričnih pukotina, koje su prethodno definirane, pokazuje veliko slaganje između dva mjerila, na taj način potvrđujući i identičan mehanizam sloma.

Kao primjer rečenog, koristeći se sličnošću ostvarenih opterećenja i poprečnih presjeka, izvršimo direktno uspoređivanje između oštećenja na velikoj ploči LSE5 i na maloj ploči SE15. Na početku konstatira se da ni jedna od njih nije doživjela proboj, oštećenja gornje strane neznatno su izraženija na većoj ploči, dok je postotak oštećenja zadnje strane ploče gotovo identičan. Osim toga, ispucanost gornje i donje strane ploče je gotovo identična. Sve prethodno vrlo je indikativno i pokazuje iznimno dobro primijenjene zakone modeliranja, posebno ako se uzme u obzir mala ploča SE 16 koja je bila izložena istoj količini eksploziva na udaljenosti koja je bila samo 15 mm manja nego kod SE15, ali je doživjela potpuno drugačiji mehanizam sloma i oštećenja – uključujući i proboj.

Linije popuštanja, koje se uobičajeno formiraju kod površinskih nosača ovog tipa, karakteriziraju oštećenja uzrokovana savijanjem ispitivanih ploča pod udarnim opterećenjem, u oba mjerila. Ista vrsta pukotina pojavljuje se na površinama ploča oba mjerila, na taj način indicirajući postojanje identičnog odziva (slika 6.).

Na slici 6. potpuno je evidentno da su lokalni i globalni odziv, manifestirani oštećenjima konstrukcijskog elemen-

ta gotovo identični na obje ploče, iako je ploča na desnoj strani 2,5 puta manja nego ploča na lijevoj strani Štoviše, gotovo identičan oblik i veličina oštećenja na donjoj strani ploče u zoni epicentra pokazuju da je moguće kvalitetno modeliranje čak i takvih lokalnih pojava kao što je formiranje pukotina u ranoj fazi odziva armiranobetonske ploče.



Slika 6. Tipična oštećenja (uključujući i pukotine) za ploče u dva različita mjerila (ploča SE15 predstavlja model ploče LSE5, umanjen za 2,5 puta, a izložen modeliranom opterećenju)

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

7 Zaključak

Sljedeći zaključci mogu biti izvedeni iz rezultata prezentiranih u ovom članku:

- Brojni problemi koji su povezani s ispitivanjima konstrukcija i elemenata pod udarnim opterećenjima zahtijevaju prelazak sa prototipova na modele. Pritom je primjena adekvatnih modela najprihvatljiviji način modeliranja ponašanja elemenata izloženih udarnom opterećenju.
- Zakoni modeliranja upotrijebljeni u ovom ispitivanju mogu, kako je prikazano, biti uspješno iskorišteni za modeliranje konstrukcija izloženih udarnom opterećenju. Zanemarivanjem utjecaja gravitacije na dobivene rezultate ne utječe se u većem mjeri, dok zanemarivanje utjecaja brzine deformiranja ispitivanih uzoraka mogu biti mnogo značajnije, posebno ako se radi o znatnim razlikama u brzinama.
- Modeliranje udarnih opterećenja od eksplozije primjenom načela kubičnog korijena pouzdan je postupak, što se potvrdilo i na rezultatima prezentiranim u ovom članku.

LITERATURA

- [1] Ross, T.J.; 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. i dr.: *Structural modelling and experimental techniques*, Newark and Hall, Prantice-Hall, New-Jersey, USA, 1983.

- [4] Noor, F.A.; 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.