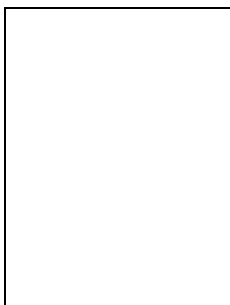


Nebojša Đuranović

Interakcija udarnog talasa eksplozije i A.B. ploče

Interaction of Blast Waves and R.C. Slab



Dr Nebojša Đuranović, dipl.ing.građ., rođen 1963. godine. Diplomirao 1988. godine na Građevinskom fakultetu Univerziteta Crne Gore. Doktorirao 1994. godine na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Šefildu - Engleska gde i sada radi kao Asistent na istraživanjima.

Dr Nebojša Đuranović, graduated civil engineer, born in 1963. Graduated in 1988 from the Civil Engineering Faculty, University of Montenegro. Since 1990 he has been a Research Associate at the Civil and Structural Engineering Department, University of Sheffield, where, in 1994, he obtained his PhD.

REZIME

Ovaj tekst se bavi opisom, analizom kratkotrajnog dinamičkog udarnog dejstva nastalog kao posledica bliske eksplozije i mogućim posledicama po tipičnu AB ploču. Ponašanje samog elementa može se podeliti na lokalni i globalni odgovor. Posebna pažnja je posvećena kvantifikovanju parametara eksplozivnog talasa i utvrđivanju granica sigurnosti elementa koje su date kao funkcija snage udara i udaljenosti elementa. Tehnika tzv. brze fotografije korišćena je da bi se posmatrao i vremenski kvantifikovao način formiranja početnih pukotina, njihovo prostiranje i eventualni proboj ploče.

Ključne riječi: eksplozija, dinamika, beton, ploča

SUMMARY

This paper describes and analyses transient dynamic loading from the close range explosion and its consequences for a RC slab. The response of a typical element can be divided into local and overall response. Particular attention has been given to quantification of the blast wave and establishment of the vulnerability of a slab through the explosive yield and the stand off. The high speed photography has been employed in order to establish the local failure propagation pattern and central punching of the slab.

Keywords: blast, dynamics, concrete, slab

1. INTRODUCTION

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

Kada se eksplozija dogodi u neposrednoj blizini AB ploče tada se rezultirajuća opterećenja nanose prvo u najbližoj, veoma ograničenoj oblasti ploče, epicentru, a onda nastavljaju da se mijenjaju sa vremenom i udaljenjem po površini ploče 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.

Funkcija opterećenja nastala kao posledica bliske eksplozije ne može se smatrati kratkotrajnim tačkastim opterećenjem (*transient point load*). Postoje jasne razlike u lokalnom odgovoru ploče izložene kratkotrajnom udarnom opterećenju zadatom tvrdim predmetom, kada je opterećenje vremenski kratkotrajno ali po jednoj strogo definisanoj oblasti, i opterećenja od bliske eksplozije kada je opterećenje kratkotrajno i djelimično lokalizovano ali pri kojem se pojavljuje i prostorna funkcija raspodjele sila koja je takođe veoma značajna za određivanje ponašanja ploče koja se posmatra.

U situaciji kada je vremensko trajanje opterećenja znatno kraće od perioda prirodnih oscilacija uzorka tada se skoro ukupan lokalni odgovor događa znatno prije negoli iole značajniji globalni odgovor konstrukcije tako da se oni mogu posmatrati odvojeno. Oblast zahvaćena u lokalnom odgovoru je obično mala i ne doseže do oslonačke zone.

Lokalni odgovor se u osnovi karakteriše razvojem centralne zone smicanja koja je oblika zarubljene kupe (*shear plug*) /1/ pri čemu se sva značajnija oštećenja i deformacije nalaze u neposrednoj blizini epicentra eksplozije ili udarne sile. Neposredno nakon nanošenja opterećenja, pored pukotina usled smicanja, pojaviće se pojedine ili čak sve od sledećih deformacija:

- (i) Formiranje radijalnih i kružnih pukotina sa središtem u epicentru eksplozije pri čemu se većina od njih nalazi na izvesnoj udaljenosti od samog epicentra,
- (ii) Formiranje kratera na obje strane ploče, sa pratećim deformacijama ili čak kidanjem armature u okviru tih granica,
- (iii) Proboj ploče negdje u zoni epicentra.

Lokalni odgovor ovog tipa karakterisaće AB ploče samo za slučajeve bliske eksplozije i "tvrdi udar" (*hard impact*) /10/. Za eksplozije na većim udaljenjima, slika 3, zakrivljenost udarnog fronta eksplozije će, u trenutku interakcije sa pločom biti beznačajna. Uzorak je tada izložen jednako raspoređenom ali još uvijek vremenski promenljivom opterećenju pa će eventualni lom usled transverzalnih sila nastati u neposrednoj blizini oslonaca.

U literaturi se mogu naći podaci o slučajevima kada se površine loma smicanjem nalaze pod pravim uglom na površinu ploče /2/. Ova vrsta loma se naziva direktno ili čisto

smicanje i kriterijum izdržljivosti se ustanovljava iz odnosa funkcije sile smicanja i veličine samog smičućeg ugiba, u pravcu postojeće ili moguće pukotine. U našim istraživanjima tj. pri situaciji opterećivanja ploče od bliske eksplozije, izgleda da mehanizam čistog smicanja ne predstavlja dominantni odgovor konstrukcije. Kritičnije od njega je dijagonalno pucanje ploče usled zatezanja u betonu koje tako pomaže formiranju zarubljene kupe smicanja. Pomjeranje ove zarubljene kupe je ograničeno postojanjem armature, pa se zahvaćeni beton dalje lomi silama pritiska.

Ogovor na savijanje ploče kao cjeline je dio globalnog ponašanja i on se karakteriše formiranjem dijagonalnih linija loma sličnih onima iz slučaja loma ploče statičkim silama, kao i bespovratnim ugibima preostalog dijela ploče.

2. PONAŠANJE MATERIJALA PRI BRZIM DEFORMACIJAMA

Kada su izloženi veoma brzim opterećenjima građevinski materijali kao beton i čelik su podložni znatnim promjenama mehaničkih karakteristika. Dijagrami napon-deformacija dobijeni pri uobičajenim ili tz. statičkim brzinama deformisanja, tj. 10^{-6} sek. $^{-1}$, moraju se uporediti sa onima dobijenim iz dinamičkih testova, u ovom slučaju iz Hopkinsonovog opita, pri čemu se ispituje beton istih karakteristika samo sada pri deformacijama čije brzine idu do 2×10^3 sek. $^{-1}$. Ovi testovi mnogo bolje karakterišu pravo stanje materijala za slučaj opterećivanja eksplozijom.

Aparatura koja je korišćena pri Hopkinsonovom opitu (*Hopkinson pressure bar test*) se sastoji od 2 čelične šipke prečnika 51.2mm koje se nalaze obješene u mreži od čeličnih žica, slika 1, /11/. Mjerne trake su bile postavljene na dva mjesta, kako bi snimale inicijalni ε_I , odbijeni ε_R i provedeni ε_T naponski talas zadat na kraju šipke. Dobijeni rezultati se koriste za određivanje dinamičkih osobina betonskog uzorka koji se posmatra između krajeva šipki pa je tako izložen pomenutim opterećenjima. Same karakteristike betona su funkcije naponskih talasa pri čemu je:

$$\sigma_s = \frac{E \cdot A}{A_s} \cdot \varepsilon_T, \quad \varepsilon_s = -\frac{2C_o}{l_o} \int_0^{td} \varepsilon_R dt, \quad \text{and} \quad \dot{\varepsilon}_s = -\frac{2C_o}{l_o} \cdot \varepsilon_R$$

(1)

σ_s - srednji napon uzorka

ε_s - prosječna deformacija uzorka

E - modul elastičnosti za čelik

A - poprečni presjek šipke

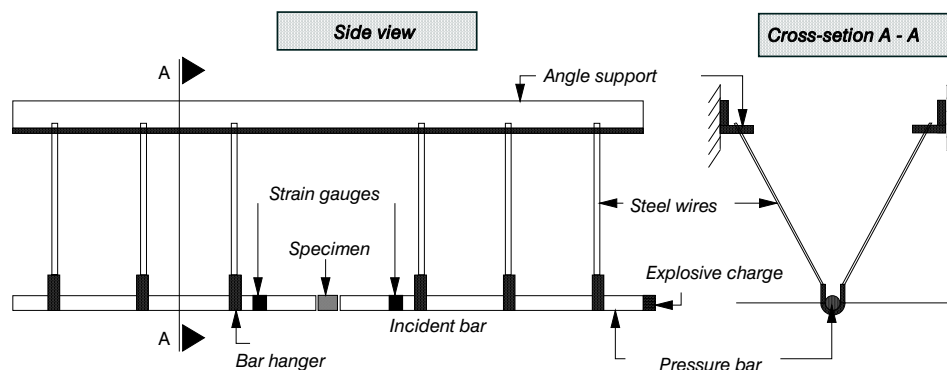
A_s - poprečni presjek uzorka

C_o - brzina prostiranja longitudinalnih talasa kroz čelik

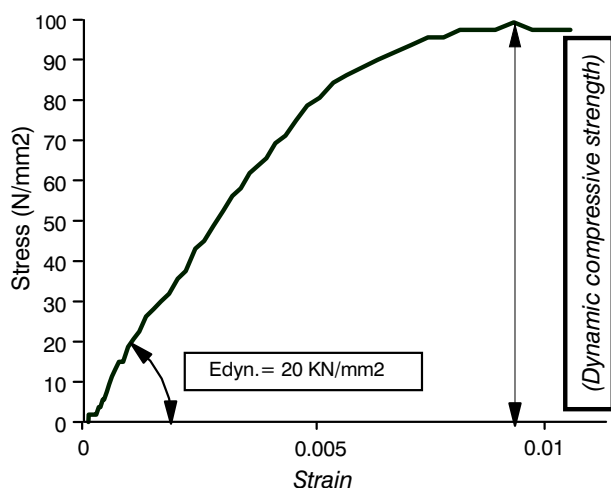
l_o - dužina uzorka

Uzorci prečnika 50 mm i dužine 16 mm (za slučaj modela u razmjeri 1:1) i prečnika 50 mm i dužine 10 mm (za model 1:2,5) su vađeni iz betonskih cilindara prečnika 125 mm i dužine 450 mm, kidani u slojeve i zatim izglacani. Ovim putem su izbjegnuti efekti ivice koji bi mogli značajno uticati na rezultate. Za iniciranje naponskog talasa dovoljnog brzog

i snažnog da izazove lom uzorka korišćeno je eksplozivno punjenje od SX2 prečnika 45 mm i debljine 3mm. Tipična veza napona i deformacije dobijena ovim putem je prikazana na slici 2.



Sl. 1 - Hopkinsonova šipka za nanošenje talasa pritiska
Fig. 1 - Hopkinson Pressure Bar Test Rig

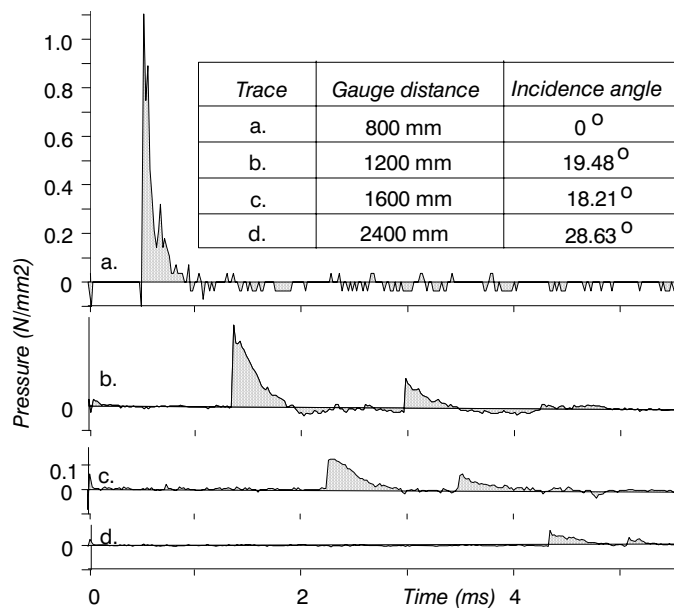


Sl. 2 - Resultati Hopkinsonovog testa
Fig. 2 - HPB test results

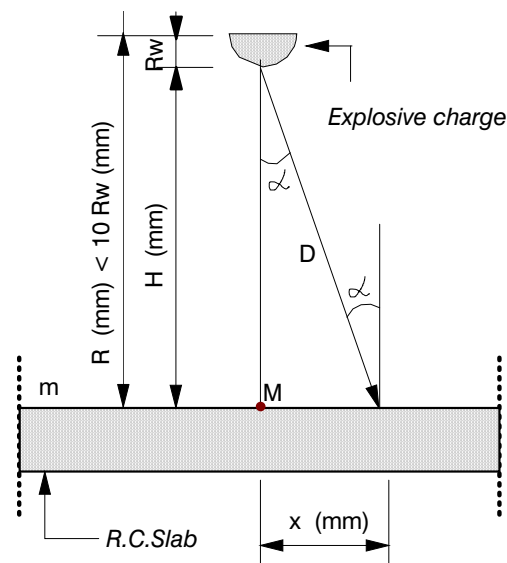
Hopkinsonovim opitom izmjerene su 2,5 do 3 puta veće čvrstoće betona nego u uobičajenim statičkim testovima pri čemu je brzina deformacija bila 10^9 puta veća. Izmjerene čvrstoće su varirale za beton modela 1:1 između 103N/mm^2 i 142N/mm^2 a modela 1:2.5 (mikrobeton) između 90N/mm^2 and 114N/mm^2 , dok su odgovarajuće brzine deformacije bile u oblasti $1.46 \times 10^3 \text{ sek.}^{-1}$ do $2.29 \times 10^3 \text{ sek.}^{-1}$. Dinamički modul elastičnosti E_d u ovim testovima je iznosio oko 22 KN/mm^2 .

3. FUNKCIJA OPTEREĆENJA

Definisanje funkcije opterećenja ploče ima prvorazredni značaj sa stanovišta daljnje analize rezultata testova. Eksplozivna punjenja korišćena ovdje 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 uvijek bila 78 grama /3/.



Sl. 3 - Tipični pritisak/vrijeme graf za punjenje od 78g
Fig. 3 - Typical pressure-time records for 78g charge



Sl. 4 - Funkcija opterećenja
Fig. 4 - Loading Function

Udarni talas nastao usled eksplozije PE4 putovaće na malim rastojanjima brzinom od 7500 m/sek. /4/. Rastojanja korišćena u ovom istraživanju su bila u regionu 50 do 250 mm za modele razmjere 1:2,5 odnosno 200 do 500 mm za modele razmjere 1:1. Prema tome interakcija udarnog talasa i ploče započinje posle 7 do 33 μ sek za slučaj manjih tj. posle 27 do 67 μ sek nakon detonacije za slučaj većih uzoraka.

Udarni talas se od punjenja prostire u svim pravcima ali sa stanovišta odgovora konstrukcije najznačajniji su tzv. vektori udarnog talasa koji proizvode sile normalne na površinu ploče. Tako na primjer, vektori udarnog talasa od punjenja postavljenog na rastojanje 500 mm od veće ploče, do njene ivice, tj. 1 m od centra, će stići posle oko 150 μ sek pri čemu će na uzorak djelovati pod uglom od 26,5°. Zbog relativne udaljenosti te tačke od mjesta eksplozije kao i zbog iskošenja vektora pritiska, vertikalna komponenta sa kojom oni djeluju po ploči će biti znatno umanjena.

Kada udarni talas stigne do ploče, nadpritisci će proizvesti naponski talas pritiska koji se prostire dalje kroz konstrukciju. Svako odbijanje tog talasa pritiska od ivica uzorka proizvešće naponske talase zatezanja. Ovi, sa druge strane, mogu prouzrokovati lokalni lom prije nego li dođe do ikakvog savijanja cijele ploče.

Ako udarni ugao između vektora napadnog fronta eksplozije i linije upravne na površinu naše ploče označimo sa α (slika 4), tada Henrych /4/ daje maksimalni, teoretski mogući pritisak $P_{(m)}$ u bilo kojoj tački ploče definisanoj sa uglom α u obliku:

$$P_{(m)} = P_{\text{det}} \cdot \left(\frac{R_w}{R} \right)^A \cdot \cos^2 \alpha$$

(2)

gdje P_{det} predstavlja pritisak u trenutku same detonacije za sferno, valjkasto ili polusferno punjenje poluprečnika R_w koja se nalazi na udaljenosti R . Parametar A je definisan oblikom punjenja i iznosi 2 za slučaj sfere a 3 za slučaj polusfere kada je ravna strana okrenuta prema posmatranom objektu. Vremenska raspodjela pritisaka $P(t)$ je data formulom:

$$P(t) = P_{(m)} \cdot \left(1 - \frac{t}{\tau} \right)^A$$

(3)

Ako razmatramo naše polusferno punjenje inicirano iz središta ravne strane kao punjenje slično sfernom koje se inicira iz centra sfere, tada se gore pomenute relacije mogu direktno upotrebiti pri čemu se može uzeti $A = 2$. U našem slučaju takođe imamo da je $R_w = 28,5$ mm za manje, odnosno 71,25 mm za veće ploče kao i P_{det} od 26,8 KN/mm². Vremensko-prostorna funkcija opterećenja može se znači napisati kao:

$$P(t) = P_{\text{det}} \cdot \left(\frac{R_w}{R} \right)^A \cdot \cos^2 \alpha \cdot \left(1 - \frac{t}{\tau} \right)^A,$$

(4)

gdje t predstavlja vrijeme mjereno od momenta interakcije udarnog talasa i ploče a τ predstavlja dužinu trajanja udarnog talasa. Jasno je da će τ zavisiti od udaljenosti punjenja i položaja posmatrane tačke na ploči. Zbog toga je odlučeno da se τ izrazi preko rastojanja između posmatranog mjesta i eksplozivnog punjenja D (mm), slika 4. Vrijednosti za τ mogu biti određene teoriski ili experimentalno. Za rastojanja do 560 mm koja su od najvećeg interesa za ovu seriju testova na malim pločama, rezultati pokazuju da pozitivni dio krive udarnog talasa predstavlja manje-više linearnu funkciju udaljenja D . Zato je za potrebe preciznijeg definisanja funkcije opterećenja vrijednost za τ bila uzeta kao:

$$\tau(\text{in } \mu \text{ sec}) = K \cdot D(\text{in mm}) \quad \text{pri čemu je } K = 0,715$$

(5)

Eksperimentima je utvrđeno da pozitivni dio udarnog talasa za punjenje korišćeno na malim pločama a postavljeno na 300 mm (max. udaljenost) od ploče, iznosi 200 μ sek pa je ova vrijednost korišćena kao krajnja vremenska granica u procesu računanja pritisaka.

Direktna implementacija *Henrych*-ovih relacija (2) i (3) daje rezultate koji nisu u saglasnosti sa eksperimentalno izmjerenim vrijednostima /3/ posebno zato što nije uključena funkcija različitog vremena dolaska udarnog talasa do različitih tačaka na ploči. Umjesto toga ove jednačine podrazumijevaju istovremeni početak nanošenja opterećenja po cijeloj ploči. Ovaj mali nedostatak može lako biti korigovan računanjem opterećenja za svaku posmatranu tačku, pri tome istovremeno računajući njegov zaostatak u odnosu na talas koji je prvi stigao do uzorka tj. središta ploče. Uz to, maksimalne vrijednosti

udarnog pritiska sračunate uz pomoć gore pomenutih jednačina a uz korišćenje preporučenih vrijednosti za A ne odgovaraju vrijednostima dobijenim u testovima. Razlog za to može biti činjenica da se preporučene vrijednosti za A odnose na sferno, cilindrično ili polusferno punjenje, za koje je pretpostavljeno da je ravnom površinom okrenuto prema konstrukciji, što nije bio slučaj o testovima koji se ovdje razmatraju. Vrijednosti pritiska izmjerene u testovima predstavljaju vertikalnu komponentu ukupnog pritiska na ploču dok *Henrych*-ove formule daju pune vrijednosti pritiska. Posle ovih i predhodno pomenutih korekcija, funkcija opterećenja za posmatranu ploču dobija oblik:

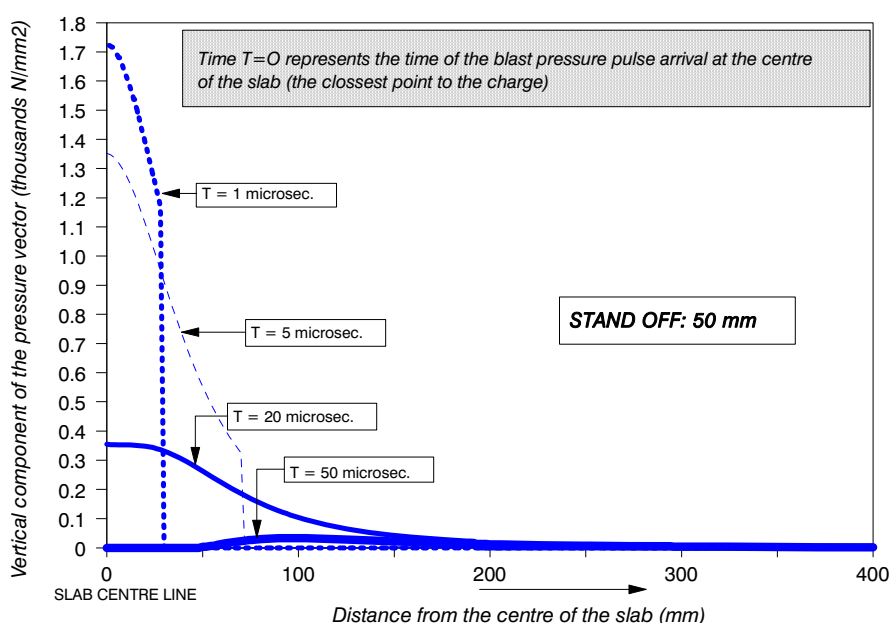
$$P(t) = P_{\text{det}} \cdot \left(\frac{R_w}{R}\right)^{2,65} \cdot \cos^3 \alpha \cdot \left(1 - \frac{t-L}{\tau}\right)$$

(6)

pri čemu je: $L = \frac{D-H}{V}$, $V = 7,5 \text{ mm}/\mu\text{sek}$ i $\frac{D-H}{V}$ predstavlja već pomenuti zaostatak koji se javlja zbog kasnijeg dolaska udarnog talasa do preostalih tačaka na ploči. Vrijednost 2,65 za A je uzeta kao aproksimacija koja se najbolje slaže sa testovima.

Sračunati rezultati za punjenje postavljeno na rastojanju od 50 mm su prikazani na slici 5, pri čemu su računanja vršena na svakih 2 mm ploče. Oni se slažu relativno dobro sa vrijednostima dobijenim iz testova a sa njima su upoređeni u tabeli 1.

Budući da je trajanje pozitivne faza udarnog talasa pri računanju uzeto tako da manje-više odgovara eksperimentalnim rezultatima, ono nije prikazano u tabeli. Vrijeme nailaska udarnog talasa do proizvoljne tačke na ploči ne smije biti miješano sa vremenom dolaska udarnog talasa do najbliže tačke na ploči (epicentra, središta ploče). Ove vrijednosti nisu upoređene u tabeli jer bi obuhvatale vremenske "nepreciznosti" detonatora L2A1.



Sl. 5 - Sračunati pritisak/vrijeme profil za punjenje od 78gr na udaljenju od 50mm
Fig.5 - Calculated pressure vs. time profile for 78g PE4 charge at 50mm standoff

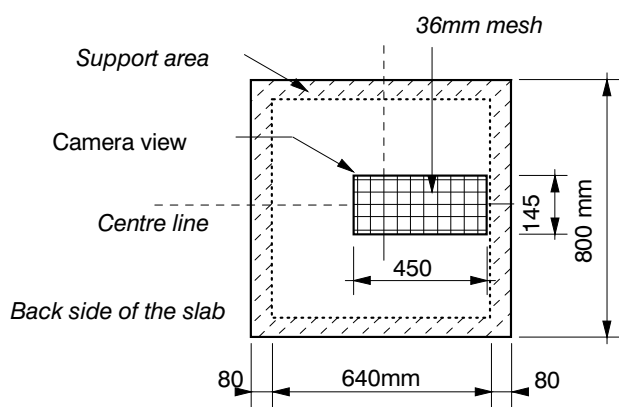
Tabela 1 - Upoređenje između mjerenih i sračunatih pritisaka
Table 1 - Comparison of measured and calculated pressures

Standoff (mm)	Distance to the epicentre (mm)	Peak pressure	
		Measured value (N/mm ²)	Calculated value (N/mm ²)
600	420	2,6	2,12
500	0	10 do 14	11,61
400	0	18 do 28	20,22
400	350	4,5 do 5,5	4,88
300	0	29 do 32	40,79
300	350	3,5	6,36
200	350	4 do 5,2	7,42
100	350	5,5	5,78

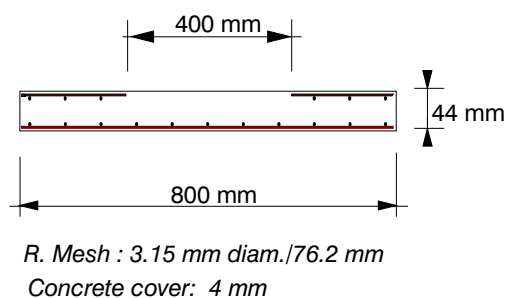
4. VREMENSKO ODREĐENJE LOKALNOG LOMA

Armirano betonske ploče korišćene u ovom istraživanju su zasnovane na tipičnim konstruktivnim elementima koji se mogu naći u različitim vrstama objekata. Modeli su tako definisani da predstavljaju približno 1:4 i 1:10 umanjena tipičnih ploča. Znači male ploče modeliraju veće u razmjeri 1:2,5.

Dimenzije manjeg modela uzorka su date na slikama 6 i 7. Sve četiri strane ploče su imale identične oslonce tipa uklještenja koji su potpuno onemogućavali horizontalna i vertikalna pomjeranja i skoro potpuno rotacije oslonačkih zona ploče.



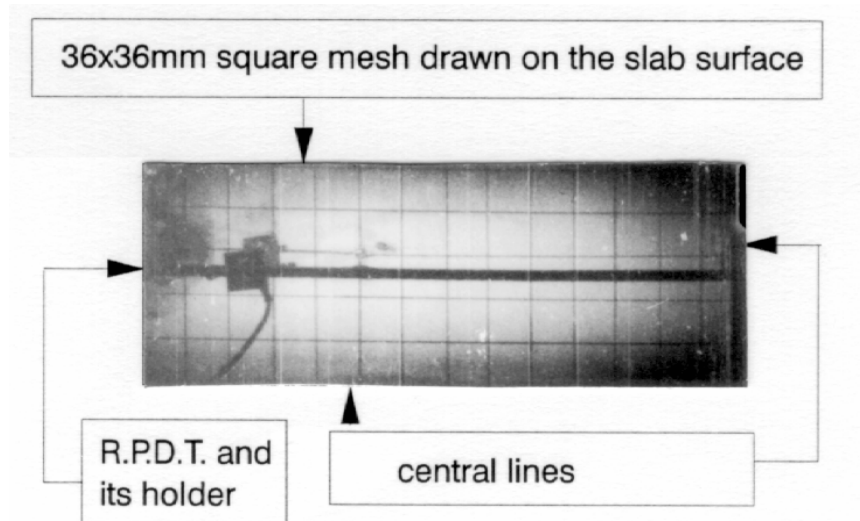
Sl. 6 - Oblast obuhvaćena snimcima velike brzine
Fig. 6 - Area that was filmed by High Speed Camera



Sl. 7 - Poprečni presjek ploče

Fig. 7 - Model slab details

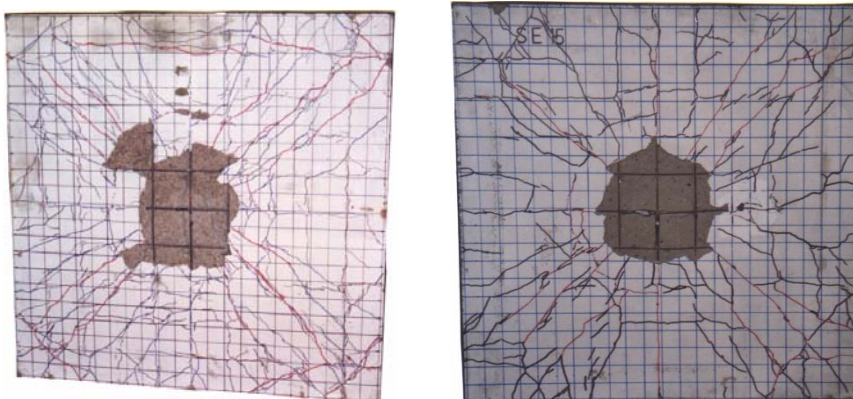
Veličina i pozicija vidnog polja kamere koja je korišćena za snimanja ploče velikom brzinom, približno su date na slici 6 dok je tipični kadar filma sa svim bitnim detaljima prikazan na slici 8.



Sl. 8 - Detalji prisutni na tipičnom kadru filma

Fig. 8 - Typical frame of the H.S. film

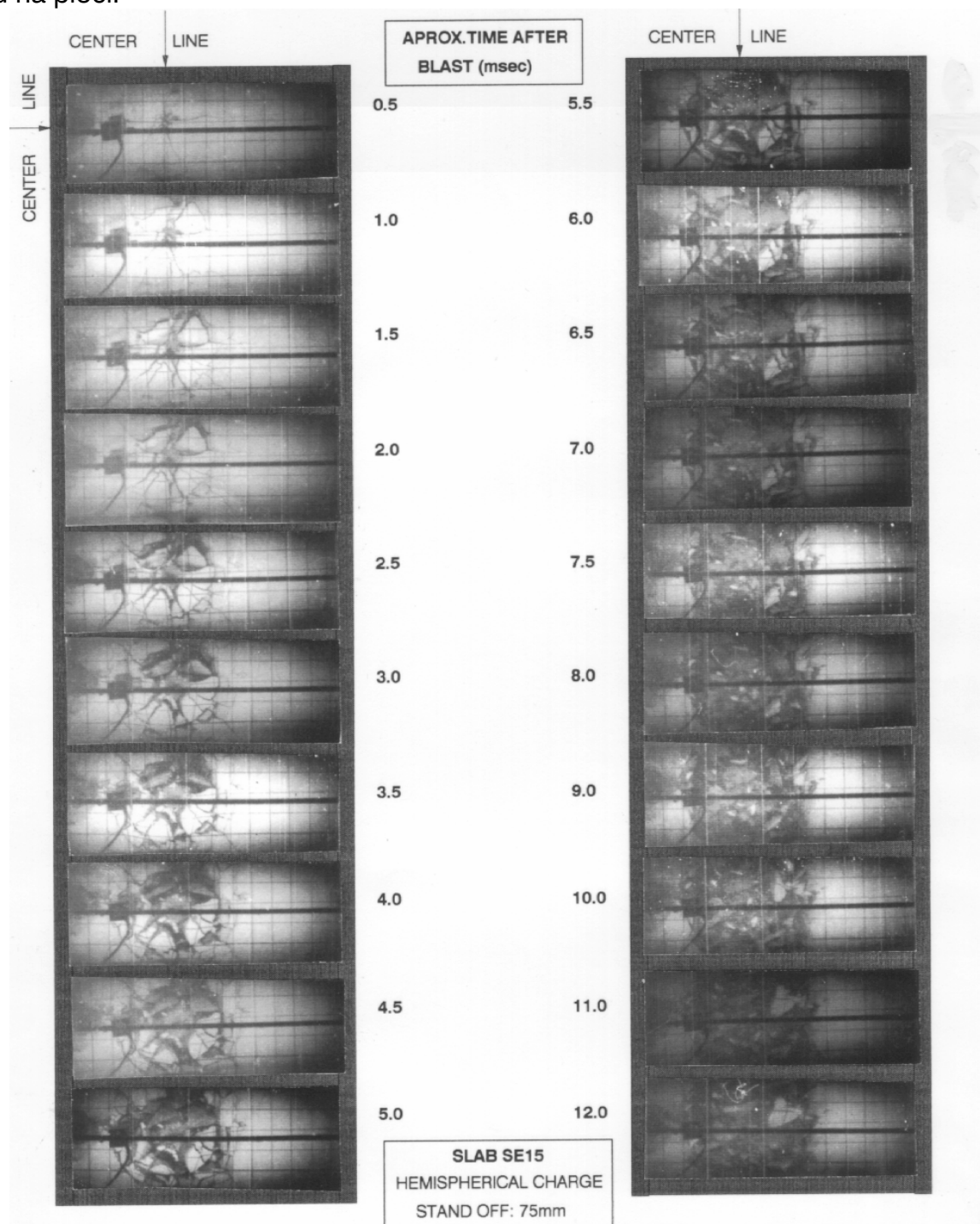
Pri statičkom testu, ponašanje svakog dijela ploče na uticaje smicanja ili savijanja u saglasnosti je sa ukupnim odgovorom elementa. Lom od kombinacije smicanje/savijanje se dešava, ali tek posle značajnih ugiba središnjeg dijela ploče. Impulsno opterećenje prouzrokovano bliskom eksplozijom je izazvalo i lokalni i globalni odgovor elementa pri tome mijenjajući oblik, mjesto i karakteristike loma u odnosu na lom dobijen u statičkim testovima. Pri povezivanju lokalnog i globalnog odgovora ploče važno mjesto zauzima prenos inicijalne energije date uzorku kao i njena raspodjela na dva pomenuta mehanizma loma. Tipični oblik loma koji se javlja pri ovim opterećenjima je dat na slici 9 dok slika 10 sadrži pojedine kadrove snimljene pmenutim filmovima velike brzine.



Sl. 9 - Oblik loma na ploči SE15, gornja i donja strana

Fig. 9 - Failure shape on the slab SE15, top and bottom sides, respectively

Lokalni odgovor se posmatra kroz mehanizam loma betona na izloženoj (*spalling*) i zaklonjenoj (*scabbing*) strani uzorka kao i odgovorom na dinamičke transversalne sile. On započinje mnogo ranije nego globalni odgovor koji je uglavnom definisan otpornošću na sile savijanja i ograničen periodom oscilovanja same ploče. Energija preostala za savijanja u toj kasnijoj fazi, će zavisiti i od količine energije prenesene ostatku ploče preko granica rano formirane, središnje zarubljene kupe smicanja. Kada proboj ploče nastupi prije kraja udarnog pulsa, dio energije će se bespovratno izgubiti kroz novoformiranu rupu na ploči.



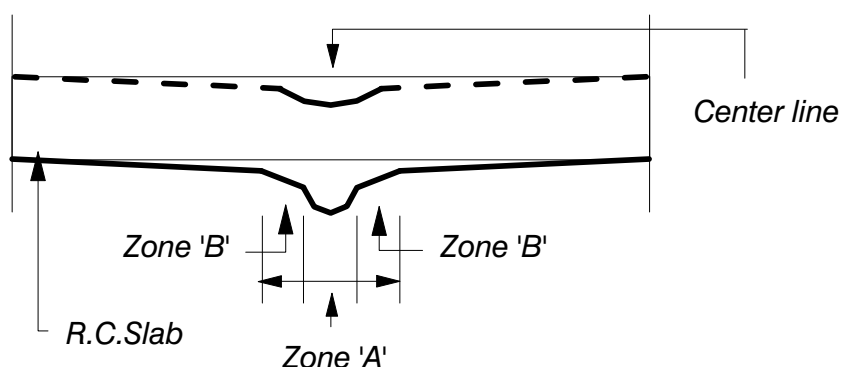
Sl. 10 - Pucanje ploče snimljeno filmom velike brzine

Fig.10 - Crack pattern as seen on H.S. films

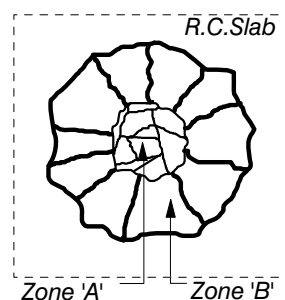
Glavne osobine lokalnog odgovora su pucanja ploče i lom betona pritiskom, što prouzrokuje kasniji lom smicanjem, krateru na obadvije strane ploče ili čak proboj, praćeno savijanjem i tečenjem armature u toj ograničenoj oblasti. Krateri na obje strane ploče posledica su udarnog talasa eksplozije koji izaziva naponski talas pritiska u ploči, a posle odbijanja o njene ivice, naponski talas zatezanja koji prouzrokuje lom na suprotnoj strani ploče (vidi poglavlje 5).

Snimanja ploče velikom brzinom jasno otkrivaju način loma i dezintegracije betona usled eksplozije. Prvo radijalne pukotine počinju da se prostiru iz same tačke epicentra na pozadini ploče. Otprilike u isto vrijeme se formira kružna pukotina poluprečnika 20 mm a sa centrom u epicentru.

Ova kružna pukotina praktično ograničava naglašeno ispupčenu oblast ploče, slika 11, (oblast A), koja je zatim potpuno izlomljena u male parčiće potpuno nepravilnih geometrijskih oblika. Sledeća kružna pukotina, oblast B, ispucaće i polomiti se u skoro identične prstenaste segmente, slika 12. Ove dve zone po veličini praktično odgovaraju završnom izgledu područja lokalnog loma.



Sl. 11 - Razvoj zone lokalnog odgovora
Fig. 11 - Development of area of local response



Sl. 12 - Pucanje prstenova
Fig. 12 - Rings segmentation

Stanje loma za lokalni odgovor karakterišu, kao što je rečeno, ispucalost, pojava kratera na obje strane ploče i eventualni proboj. Sve ove pojave su uglavnom posledice prostiranja naponskih talasa kroz ploču ali se mora znati da izvesni dio lokalnog oštećenja može biti i posledica kasnijeg globalnog odgovora ploče kao i lokalnih savijanja armature. Kao posledica rečenog očito je da sa krajnji oblik lokalnog loma uspostavlja veoma rano u vremenskom odgovoru uzorka, pri čemu se daljnja oštećenja javljaju mnogo kasnije, u toku globalnog odgovora konstrukcije. Ukupno vrijeme potrebno za potpuno prigušenje oscilacija posmatrane ploče može biti procijenjeno sa grafova ugib/vrijeme i ono za manje ploče iznosi 60 milisek a za veće do 150 milisek.

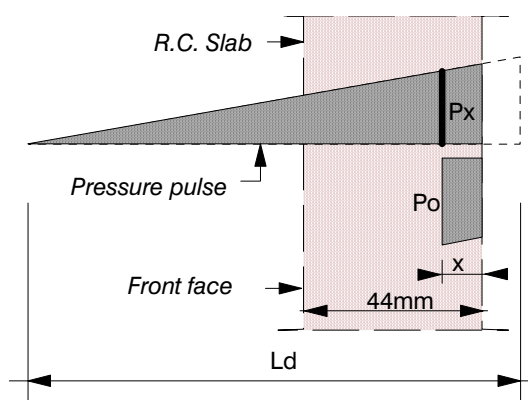
U testovima koji se ovdje komentarišu pojava prvih pukotina, koje su na filmu vidljive golim okom, dešava se posle 2 do 100 mikrosekundi nakon interakcije udarnog talasa i posmatrane ploče. Za opšti slučaj može se reći da se golim okom vidljive pukotine na ploči pojavljuju u sledećem redosledu ($1/5$ i $1/6$):

- (1) Radijalne pukotine na poledini ploče a sa početkom u epicentru, pojavljuje se u toku prvih 100 mikrosek nakon nanošenja opterećenja a posle prvih 190 mikrosekundi dužina im je oko 147mm,
- (2) Bliža kružna pukotina se formira na poluprečniku od oko 20mm od centra a pojavljuje se skoro u isto vrijeme kao i radijalne pukotine,
- (3) Dalja kružna pukotina nastaje na udaljenosti 80 do 130 mm od centra pri čemu je potpuno formirana do 800 mikrosekundi posle početka opterećenja.

Oblast ograničena bližom pukotinom ne puca po pravilnim geometriskim oblicima dok se ona ograničena daljom pukotinom lomi u skoro pravilne segmente prstena, slika 10. Maksimalne izmjerene brzine prostiranja pukotina, dobijene direktnim očitavanjem sa filmova, su reda veličine 420 m/sek do 770 m/sek.

5. LOM BETONA NA ZAKLONJENOJ STRANI PLOČE

Ako imamo samo pojavu loma betona na neizloženoj strani ploče, slika 13, ili drugim riječima, dinamička čvrstoća na pritisak nije dostignuta, tada se debljina slojeva betona



Sl.13 - Debljina sloja odvaljenog betona
Fig. 13 - Scab thickness

odvaljenih zbog prostiranja naponskih talasa zatezanja lako može sračunati, uz uslov da poznamo sve karakteristike funkcije opterećenja kao i dinamičke karakteristike betona.

Prigušenje nastalo zbog rasipanja talasa može se uzeti ko 10%, /6/. Sa slike 13 se vidi da će za sloj debljine x rezultirajući napon biti jednak dinamičkoj čvrstoći betona na zatezanje koja se može procijeniti da je, za ove brzine deformacija, oko 2,5 puta veća nego statička tj.

$$f_{dt} = P_o - P_x \quad (7)$$

gdje: f_{dt} - dinamička čvrstoća betona na zatezanje, procijenjena na 10 N/mm²
 P_o - veličina max pritiska udarnog talasa (N/mm²) tj. njegova amplituda
 P_x - odgovarajući trenutni pritisak na mjestu odvaljenog sloja betona (N/mm²)

Ako posmatrani udarni talas aproksimiramo sa trouglom, vrijednost P_x se može sračunati kao:

$$P_x = \frac{P_o \cdot (L_d - 2x)}{L_d}$$

(8)

pri čemu L_d predstavlja dužinu udarnog talasa:

$$L_d = T_d \cdot V$$

(9)

gdje T_d predstavlja trajanje pozitivne faze udarnog talasa u milisekundama a V je longitudinalna brzina naponskog talasa kroz beton, koja iznosi 3400 mm/milisek. Otuda:

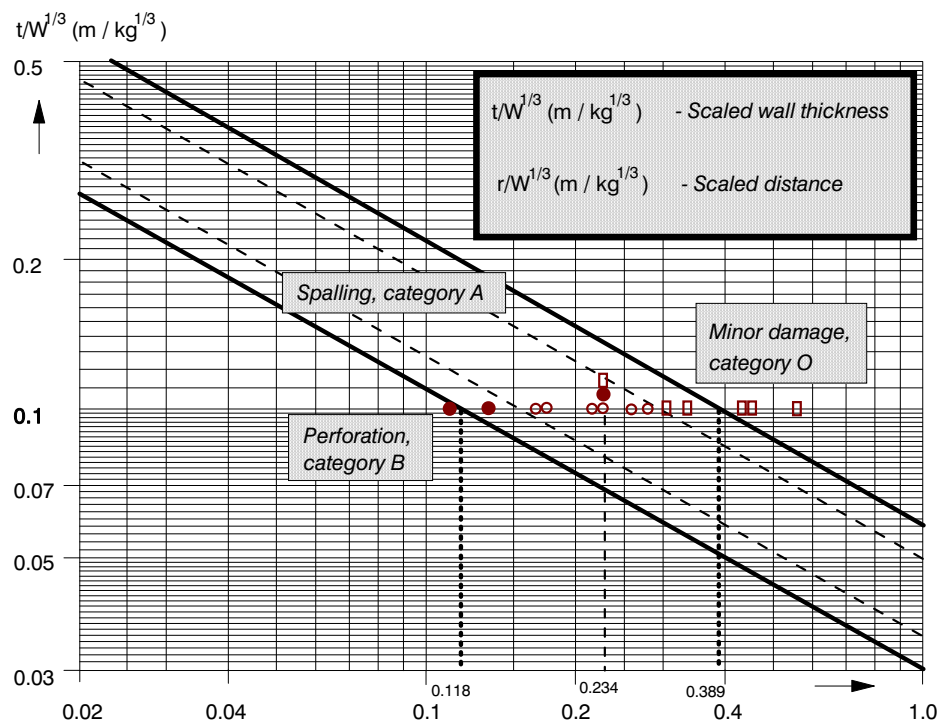
$$x = \frac{L_d \cdot f_{dt}}{2 P_o}$$

(10)

Ako posmatramo istu ploču koja je data na odabranim kadrovima i u slikama 9 i 10, za koju izračunati maksimum funkcije opterećenja u epicentru iznosi 846,31 N/mm², i gdje je trajanje pozitivnog dijela udarnog talasa 0,05362 milisek (poglavlje 3) onda $L_d = 182,3$ mm. Nakon oduzimanja 10% zbog rasipanja talasa može se dobiti debljina pojedinačnog odvaljenog sloja betona koja iznosi $x = 2,39$ mm. Svaki naredni sloj će biti formirani na potpuno identičan način pa će biti čak i iste debljine kao ovaj, ako se pretpostavi da je riječ o talasu u obliku pravouglog trougla, što znači ako se pretpostavi trenutni rast udarnog talasa do njegove maksimalne vrijednosti P_o .

6. PROCJENA MOGUĆIH OŠTEĆENJA

Predviđanja oštećenja kod AB ploča obično se kreću u sferi procjene mogućeg loma u domenu lokalnog odgovora, što je u najtješnjoj vezi sa karakteristikama eksplozivnog punjenja i debljinom ploče. Hader /8/ daje vezu između debljine ploče t , udaljenosti eksplozivnog punjenja r i kubnog korijena ekvivalentne težine eksplozivnog punjenja od TNT, W , za sve slučajeve kombinacija gore pomenutih parametara, slika 14.



Sl. 14 - Procjena povredljivosti ploča
Fig. 14 - Estimate of the slab damage

Sva oštećenja su ovdje podijeljena na kategorije O, A i B. O predstavlja neznatna oštećenja dok A čine pojave znatnijih odvaljivanja betona sa poledine ploče. Kategoriju B čine slučajevi ogromnih oštećenja ili proboja ploče. Značajno je primijetiti da ova klasifikacija uopšte ne sadrži ograničenja u vezi sa relativnim položajem punjenja u odnosu na ploču pa se centralna i pomjerena opterećenja razmatraju na isti način čime su i vrsta i uticaji različitih oslonaca potpuno ignorisani.

Ploče koje su bile probijene označene su na slici 14 sa crnim podebljanim kružićem, dok su sve ostale ploče sa značajnijim oštećenjima prikazane običnim kružićima. Ploče sa malim ili bez oštećenja su označene praznim pravougaonicima. Kao što je već rečeno energetski ekvivalent 1 kg PE4 je 1,13 kg TNT eksploziva pa se može zaključiti da će ploča, za slučajeve udaljenosti punjenja do 173 mm proći bez ili sa malim štetama, za rastojanja između 173 i 52,5 mm imaćemo znatna oštećenja, dok će sva rastojanja manja od 52,5 mm proizvesti proboj ploče. Moji testovi pokazuju da su predviđanja proboja optimistička dok su predviđanja djelimičnog loma slojeva betona subjektivna i neprecizna. Zato, ako kao mala ili nikakva označimo sva oštećenja koja zauzimaju manje od 1,7% površine betona, onda možemo ustanoviti nove relacije koje će preciznije opisivati nastalu štetu i povredljivost ploča. Iako u [8] nisu date analitičke funkcije koje opisuje linije na slici 14 može se pokazati [1] da je granica između djelimičnog loma i potpunog proboja ploča sračunata kao:

$$(11) \quad y = K \cdot x + \beta \quad \text{to jest:}$$

$$(12) \quad \log \frac{t}{W^{\frac{1}{3}}} = -K \cdot \log \frac{r}{W^{\frac{1}{3}}} + \beta$$

pri čemu je : $K = 0,224548$ a $\beta = -1,522878$. Granica između malih i značajnih oštećenja ima isti oblik samo što je sada vrijednost za $\beta = -1,219$.

Novouspostavljene granice koje će zadovoljavati testove iz ovog ciklusa istraživanja kao i dati striktnije granice oštećenja, imaju ponovo isti nagib i oblik samo je linija proboja sada $\beta = -1,462274$ dok linija bez ikakvih lomova ima $\beta = -1,3023$. Znači da bi smo našli traženu debljinu t za neku AB ploču koja će zadovoljavati zadate kriterijume oštećenja možemo postupiti na sledeći način: ako na primjer izaberemo t tako da:

$$(13) \quad t \geq W^{0.33} \cdot 10^{-K \cdot \log \frac{r}{W^{0.33}} + \beta}$$

pri čemu je $\beta = -1,462274$ tada eksplozivno punjenje ekvivalentne težine W a postavljeno na rastojanju r od posmatrane ploče neće izazvati njen proboj. Ako u jednačini (13) zamijenimo $\beta = -1,3023$ onda težina W ne može prouzrokovati lom na površini većoj od 1,7% od površine posmatrane ploče. Pri svemu ovome t i r su dati u metrima dok je W dato u kg TNT-a.

Novodobijene granice su na slici 14 označene debelom isprekidanom linijom. $t / W^{\frac{1}{3}}$ je za slučaj malih ploča iznosilo 0,103 dok je za velike ploče bilo 0,101. Vrijednosti koje padaju između ove dvije linije će, kao i prije, predstavljati znatna oštećenja poledine ploče, za situacije kada su primijenjeni uobičajeni procenti armiranja. Interesantno je zapaziti da su ploče koje nisu bile armirane kao i one koje su imale neuobičajeno mali odnos raspona i debljina pokazale rezultate koji se ne uklapaju kako u *Hader*-ove tako ni u nove linije. Za oba pomenuta slučaja bilo je $r / W^{\frac{1}{3}} = 0,234$.

Kinney and Graham /9/ daju odnos između debljine ploče r (m) i veličine eksplozivnog punjenja W (pri čemu se ponovo koristi ekvivalentna težina u kilogramima TNT-a) koja će izazvati proboj, u obliku:

$$W = \beta \cdot r^3 \quad (14)$$

pri čemu je β koeficijent proboja. Može se pretpostaviti da je ova relacija dobijena za slučaj dodira punjenja i ploče ali mi ćemo je ovdje posmatrati za slučaj bliskih eksplozija (poglavlje 1). Za armirani beton β ima vrijednost od 27 kgTNT/m³. Ako ponovo primijenimo faktor ekvivalencije između PE4 i TNT (poglavlje 3), punjenje neophodno da bi se probila mala, predhodno opisana ploča bi trebalo da ima $W = 0,2$ grama PE4, budući da je r , debljina ploče 0,044 m. Za ploče razmjere 1:1, kod kojih je $r = 0,11$ m, W bi trebalo da bude 31,8 grama PE4. Kako je kod malih ploča W bilo 78 grama a proboj je bio dostignut samo za slučajeve rastojanja od 60 mm ili manje, može se ocijeniti da dati koeficijent proboja armiranog betona znatno podcjenjuje njegovu stvarnu otpornost.

7. ZAKLJUČAK

- (1) Povećanje brzine deformacija na 10³ sek⁻¹ dovodi do 2,5 - 3 puta većih čvrstoća betona na pritisak (poglavlje 2).
- (2) Opterećenja ploče nastala od zakrivljene strane polusferičnog punjenja mogu se sračunati kako je objašnjeno u poglavlju 3.
- (3) Filmovi napravljeni pri brzinama od 10.000 slika u sekundi su analizirani i određena zapažanja su iznesena u poglavlju 4.
- (4) Parametri jednačine koje pokrivaju vulnerabilitet AB ploča izloženih uticaju eksplozije, su dati u poglavlju 6.

8. ZAVRŠNA NAPOMENA

Autor se zahvaljuje svom mentoru Dr A.J. Watson za korisne savjete u toku istraživanja a takođe i svojim tehničarima R. Mellor i A. Hindle za njihovu pomoć u eksperimentalnom dijelu programa (svi pomenuti su sa Građevinskog fakulteta Univerziteta u Šefildu).

9. REFERENCES

/1/ ĐURANOVIĆ, N.: Impulsno opterećenje na AB pločama, (na engleskom), Doktorska disertacija, Univerzitet u Šefildu, april 1994.

/2/ ROSS, T.J. and KRAWINKLER, H.: Impulsno čisto smicanje betona, (na engleskom), ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 111, No. 8, avgust 1985.

/3/ ĐURANOVIĆ, N. WATSON, A.J.: Impulsno opterećenje na AB pločama - Vremenska funkcija opterećenja, (na engleskom), u Zborniku radova sa "Third International Conference on Structures Under Shock and Impact - SUSI", Madrid, Španija, jun 1994, str.63-70.

/4/ HENRYCH, J.: Dinamika eksplozije i njena primjena, (na engleskom), Elsevier Scientific Publishing Company, Oxford, 1979.

/5/ ĐURANOVIĆ, N.: AB ploče izložene opterećenjima velikih brzina - lokalni lom, djelovi prezentacije sa "International Conference on Damage by Impact and Explosions Information Exchange - DIXIE", april 1993, Royal Military Collage, Shrivenham, Engleska.

/6/ ĐURANOVIĆ, N., WATSON, A.J.: Impulsno opterećenje na AB pločama - vremenska funkcija lokalnog loma, (na engleskom), u Zborniku radova sa "7th International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures", april 1995, Manhajm, Njemačka, str. 125 - 132.

/7/ KROPATSCHECK, M.O., Testovi i rezultati bliske eksplozije, (na engleskom), iz "Proceedings of the First International Symposium on Interaction of Non-nuclear Munitions with Structures", Kolorado, SAD, maj 1983, str. 227-236.

/8/ HADER, H., Uticaj eksplozivnih punjenja na zidove, (na engleskom), iz "Proceedings of the First International Symposium of Interaction of non-nuclear munitions with structures", Kolorado, SAD, 10 - 13 maj, 1983, str. 221-226.

/9/ KINNEY, G. F. and GRAHAM, K. J., Eksplozije u vazduhu, (na engleskom), izdavač Springer-Verlag, Njujork, 1985.

/10/ ĐURANOVIĆ, N., WATSON, A.J., CHRISP, T.M.: Prosti modeli i testiranja za ustanovljavanje uticaja dinamičkih opterećenja na armirano betonske ploče i grede, (na engleskom), Zbornik radova sa "International Conference on Structural Design for Hazardous Loads, I.S.E. and B.R.E. ", april 1991, Brighton, Engleska, str. 62 -70.

/11/ ĐURANOVIĆ, N.: Ploče i grede izložene udarima malih brzina, sa predavanja za "International working group on Impact - Impact Club", januar 1992, Šefild.