

Nebojsa Đuranović¹

PROJEKTOVANJE AB KONSTRUKCIJA ZA DEJSTVO EKSPLOZIJE

Rezime:

U ovom članku je predstavljena jedna jednostavna i konzervativna metoda za određivanje potrebnih dimenzija i karakteristika AB presjeka koji je izložen udaru eksplozivnog talasa. Metoda se zasniva na principu izjednačavanja kinetičke energije predate AB elementu i energije potrebne za deformisanje AB elementa do određenog, predhodno zadatog nivoa. Obrađivan je slučaj impulsnog opterećenja kod koga je dužina trajanja opterećenja znatno kraća od sopstvenog perioda oscilovanja elementa koji treba dimenzionisati.

Ključne riječi: eksplozija, armirani beton, dimenzionisanje, impuls

BLAST DESIGN OF RC STRUCTURES

Summary:

This paper presents one simple and conservative method for the blast design of RC structural elements. The method is based around principles of equilibrium of kinetic energy given to an RC element during the blast and strain energy acquired by the element during its deformation to pre-set levels. A special case of impulsive regime of element response has been considered. This could be applied whenever the natural period of RC structure to be designed is much longer than the duration of the blast loading itself.

Key words: explosion, reinforced concrete, design, impulse

¹ Dr, docent, Građevinski fakultet, Univerzitet Crne Gore, Podgorica.

1 OSNOVE ENERGETSKE METODE

Metoda uravnoteženja energija primijenjena na dimenzioniranje AB elemenata izloženih dejstvu eksplozije je danas daleko najpopularnija metoda dimenzioniranja ovako opterećenih AB konstrukcija. Metoda se zasniva na principu izjednačavanja kinetičke energije predate AB elementu u toku eksplozije i energije potrebne za deformisanje AB elementa do određenog, predhodno zadatog nivoa ili bolje reći energije koju elemenat potrošu da bi se deformisao do određenog nivoa oštećenja. Pri tome se masa elementa koja utiče na nivo potrebne energiju za njegovo deformisanje određuje izjednačavanjima odgovora neprigušenog oscilatornog sistema sa jednim stepenom slobode kretanja i stvarnog elementa koji dimenzionišemo. Izrazi za moment nosivost presjeka se pri tome određuje primjenom teorije plastičnosti.

Kada je vrijeme trajanja nanošenja opterećenja udarnim talasom eksplozije t_d kratko u odnosu na period oscilovanja posmatranog sistema T , kaže se da je opterećenje impulsivno. Ako je situacija obrнутa kažemo da je opterećenje kvazi-statičko. Ovaj slučaj se obično događa kada opterećenje potiče od eksplozije gase - npr. plinske boce i tada se princip dimenzioniranja (donekle) razlikuje od onog predstavljenog u ovom članku.

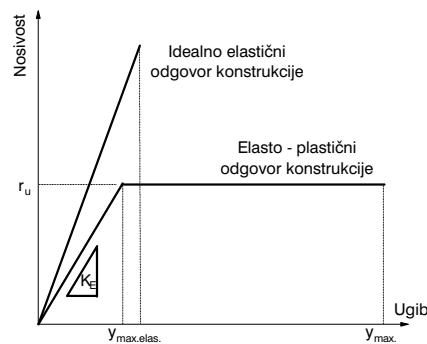
Znači, pri korišćenju energetske metode polazimo od dinamičkih (impulsnih) karakteristika opterećenja i vibracionih karakteristika posmatranog AB elementa.

2 PRIMJENA METODE PRI DIMENZIONISANJU AB PRESJEKA

Kinetička energija eksplozije KE koja se tokom eksplozije predaje AB elementu treba tokom odgovora konstrukcije da bude prihvaćena energetskim potencijalom AB elementa na deformaciju, to jest mogućom (prihvaćenom, potrošenom) deformacionom energijom sistema SE . To znači da će odnos među njima biti:

$$KE = SE \quad (1)$$

Pri idealno elastičnom odgovoru AB elementa, nosivost presjeka raste proporcionalna sa ugibom, pri čemu je ekvivalentna elastična krutost posmatranog AB sistema k taj faktor proporcionalnosti, slika 1.



Slika 1 - Idealno elastični i elasto-plastični odgovor konstrukcije

Potencijalna energija deformacije AB elementa **SE** predstavlja površinu ispod dijagrama napadne sile i ugiba, a sve do nivoa maksimalnih ugiba.

Ona se znači može izraziti kao:

$$SE = \frac{1}{2} \cdot k \cdot y_{\max} \cdot y_{\max} = \frac{k \cdot y_{\max}^2}{2} \quad (2)$$

gdje je:

k krutost posmatranog elementa, a

y_{max} njegov maksimalni (u ovom slučaju: elastični) ugib uslijed dinamičkog opterećenja.

Kombinovanjem poznatih teorema o impulsu udarnog talasa eksplozije i kinetičkoj energiji dobija se:

$$KE = \frac{M \cdot V_0^2}{2} = \frac{M}{2} \cdot \left(\frac{I}{M} \right)^2 = \frac{I^2}{2M} \quad (3)$$

gdje je:

I impuls od eksplozivnog opterećenja,

M koncentrisana (pripadajuća) masa konstrukcije ili elementa.

Na osnovu karakteristika predhodno definisane (zadate) projektne eksplozije impuls projektnog udarnog talasa **I** se može veoma jednostavno sračunati [1].

Izjednačavanjem deformacione energije AB elementa **SE** i kinetičke energije udarnog talasa **KE** dobija se:

$$y_{\max} = \frac{I}{\sqrt{k \cdot M}} \quad (4)$$

Ovaj izraz će za posmatrani AB elemenat, uz predhodno poznavanje ekvivalentne krutosti i pripadajuće mase **M** AB elementa, dati niz vrijednosti maksimalnih pomjeranja **y_{max}**, u odnosu na različite vrijednosti impulsa udarnog talasa, to jest različite projektne eksplozije. Ova linija se zato i naziva asymptota impulsa.

Pripadajuću masu elementa **M** dobijamo upoređivanjem energetskih izraza (izraza za izvršeni rad, potencijalnu energiju deformisanja i kinetičku energiju) stvarnog, posmatranog, sistema (recimo grede uklještene na oba kraja) i odgovarajućeg dinamičkog sistema sa jednim stepenom slobode (opruga - masa) opterećenog istom napadnom (dinamičkom) silom (koja izaziva ista pomjeranja) kao i stvarni sistem [2].

Dakle, pripadajuće mase elementa **M**, zavise od statičkog sistema i šeme opterećenja posmatranog AB elementa, i kreću se od 78% ukupne mase elementa za ravnomjerno podijeljeno opterećenje na prostoj gredi, do 24% ukupne mase kod konzole opterećene koncentrisanim impulsnim opterećenjem na svome kraju. Znači ovi procenti, sa kojima se množi ukupna (predpostavljena) masa elementa koji se dimenzioniše, dobijeni su upoređenjem energija dinamičkog sistema masa - opruga sa jednim stepenom slobode, pri čemu je prigušenje sistema zanemareno i stvarnog

sistema koji posmatramo. Vrijednosti procenata kojima treba množiti (prepostavljenu) krutosti stvarnog presjeka da bi se dobila ekvivalentna krutost, mogu se, u zavisnosti od posmatranog statičkog sistema i opterećenja, sračunati na isti način.

Maksimalni ugib y_{max} elementa koji treba dimenzionisati može se unaprijed definisati preko dozvoljenog nivoa rotacije u osloncu posmatranog elementa. Može se reći da taj zadati ugib predstavlja u stvari mjeru dozvoljenih oštećenja konstrukcije. Eksperimentalnim putem, i za ovu svrhu dovoljno precizno, je dobijeno da se rotacije u osloncu, zavisno od nivoa dozvoljenog oštećenja a za opterećenja eksplozijom, mogu kretati od 2° do 4° (što odgovara stanju pred kolaps) [3]. Ovdje treba napomenuti da se za čelične konstrukcije umjesto pristupa ograničavanjem ugiba koristi pristup po kome se daje (ograničava) najveći mogući duktilitet konstrukcije. Pri tome se duktilitet daje kao odnos graničnih i ugiba na nivou elastičnosti. Za ekstremni slučaj najvećih rotacija oslonaca kod čeličnih elemenata od 12° duktilitet iznosi 20.

Nivo eventualnih (dozvoljenih) oštećenja posmatranog AB elementa se, znači, kontroliše nivoom vrijednosti maksimalnog (dinamičkog) ugiba y_{max} .

Za slučaj mnogo realnijeg, elasto - plastičnog odgovora konstrukcije, slika 1, osnovna jednačina veze, između potencijalne energije deformacije AB elementa SE i kinetičke energije KE predate AB elementu, može se napisati u obliku:

$$\frac{I^2}{2M} = r_u \cdot \left(y_{max} - \frac{y_{max,elas}}{2} \right) \quad (5)$$

gdje je:

r_u jedinična dinamička granična nosivosti presjeka, data u funkciji momenta nosivosti, a određena primjenom teorije plastičnosti [4].

$y_{max,elas}$ vrijednosti ugiba na nivou granice elastičnosti.

Značenja za r_u , $y_{max,elas}$ i y_{max} , se mogu vidjeti i sa slike 1.

Kroz r_u treba unijeti (prepostavljene) karakteristike AB elementa koji treba dimenzionisati, da bi se zatim, (iterativnim) rešavanjem gornjeg izraza, odredile karakteristike betonskog presjeka i količina i kvalitet potrebne armature. Kako je masa konstrukcije u stvari ta koja se "suprostavlja" opterećenju od eksplozije, obično se na samom početku usvaja procenat armiranosti presjeka (između 1 do 2 %) i kvalitet materijala, a određuju se dimenzije presjeka, recimo b i d .

Referenca [3] daje izraze za sračunavanje funkcije r_u za različite statičke sisteme i opterećenja. Tako, na primjer, za obostrano uklještenu AB gredu opterećenu ravnomjerno raspoređenim udarnim talasom proizilazi da je:

$$r_u = \frac{8(M_n + M_p)}{l^2} \quad (6)$$

U ovom izrazu M_n predstavlja granični negativni moment nosivosti, a M_p granični pozitivni moment nosivosti AB presjeka. Da bi smo daljnji postupak pojednostavili posmatrajmo simetrično armiran AB presjek, koji će se najčešće i koristiti kod

dimenzionisanja za slučaj opterećenja eksplozijom. Jasno je da su ova dva momenta za simetrično armirani presjek jednaka.

Jasno je i da se ovi momenti nosivosti $M_n = M_p = M$ mogu izraziti u funkciji dimenzija posmatranog presjeka, količine armature i mehaničkih karakteristika sastavnih materijala.

Bitno je zapaziti da se u zavisnosti od načina sračunavanja ovih momenata može izabrati prihvativi nivo oštećenja za AB elemenat koji dimenzionišemo. Recimo, ako želimo da se u presjeku ne pojavi prslina prilikom opterećivanja projektnom eksplozijom, ovaj moment nosivosti M ćemo odrediti kao da govorimo o homogenom betonskom presjeku.

Uz korišćenje pravougaone raspodjele napona po visini pritisnutog betona, a za situaciju kada želimo da se u pravougaonom presjeku dimenzija $b \times d$ (statičke visine h) dostigne nivo tečenja armature A_a , koja ima dinamičku tačku tečenja $f_{y,d}$ za sračunavanje momenta nosivosti M možemo koristiti izraz:

$$M = \frac{A_a \cdot f_{y,d}}{b} \cdot (h - 0,5x), \quad (7)$$

pri čemu se položaj neutralne ose x AB presjeka, može približno izračunati kao:

$$x = \frac{0,8}{1 + \varepsilon_a / \varepsilon_b} \cdot h \quad (8)$$

uz pretpostavljanje dilatacija u betonu preko 3 %.

Ako se želi u presjeku dozvoliti još veći nivo oštećenja, pa i sami lom armature, tada se moment nosivosti presjeka može sračunati kao:

$$M = A_a \cdot f_{y,d} \cdot z \quad (9)$$

gdje je z krak unutrašnjih sila u presjeku.

Da bi smo u početnoj energetskoj jednačini ostali samo sa nepoznatim karakteristikama presjeka (recimo b i d ili h), a nakon što smo funkciju r_u uspjeli da izrazimo preko tih karakteristika, trebamo se oslobođiti i nepoznate $y_{max,elas}$.

Sa slike 3 se vidi da se ugib na granici elastičnosti $y_{max,elas}$ može sračunati po izrazu:

$$y_{max,elas} = \frac{r_u}{K_E} \quad (10)$$

Znači definisanjem ekvivalentne elastične krutosti K_E preko karakteristika traženog AB presjeka problem će biti riješen, jer u početnoj energetskoj jednačini, kao nepoznate, ostaju samo te same karakteristike AB presjeka.

Ekvivalentna elastična krutost K_E je krutost koja se dobija izjednačavanjem maksimalnih elastičnih ugiba posmatranog AB elementa i pomjeranja odgovarajućeg dinamičkog sistema klatno - opruga (sistem sa jednim stepenom slobode). Znači ona se dobija na isti način na koji su sračunati i procenti kojima se množi ukupna

masa, a u cilju određivanja pripadajuće mase \mathbf{M} odgovarajućeg oscilatornog sistema. Ova ekvivalentna krutost je već sračunata i data u obliku tabela za mnoge kombinacije opterećenja i statičke sisteme koji se mogu pojaviti u praksi [5]. Na primjer, za uklještenu, simetrično armiranu gredu opterećenu ravnomjerno podijeljenim opterećenjem od udarnog talasa eksplozije, ona je data kao:

$$K_E = \frac{307EI}{l^4} \quad (11)$$

gdje je:

E modul elastičnosti, a

I moment inercije posmatranog presjeka.

Ovim putem je i ekvivalentna elastična krutost K_E definisana preko karakteristika AB presjeka koji se želi dimenzionisati, pa se sada mogu svi ovi izrazi unijeti u početnu energetsku jednačinu (5) i direktnim probanjem doći do najpogodnijih dimenzija \mathbf{b} i \mathbf{d} (ili \mathbf{h}) betonskog presjeka.

Ne smije se zaboraviti da je kod prikazanog postupka primijenjena metoda dimenzionisanja za slučaj "kratkotrajnog", to jest, impulsnog dejstva udarnog talasa. Ta polazna predposatavka o impulsnoj prirodi opterećenja, mora se na kraju provjeriti upoređenjem prirodnog perioda oscilovanja sračunatog AB elementa i dužine trajanja pozitivne faze udarnog talasa. Ako nisu ispunjeni vibracioni uslovi "kratkotrajnog" opterećenja, dimenzioniranje se mora obaviti postupkom za kvazi-statičko djelovanje udarnog talasa, koje je dosta slično gore izloženom.

LITERATURA

- [1] *Primjena energetske metode za dimenzioniranje AB elemenata izloženih udarnom talasu eksplozije*, N. Đuranović, Istraživanja, br.1, Građevinski Fakultet, Podgorica, u štampi.
- [2] *Blast and Ballistic Loading of Structures*, P.D.Smith i J.G. Hetherington, Butterworth-Heinemann Ltd, 1994, Oxford, str. 202 - 203.
- [3] *Blast effects on buildings - Design of buildings to optimize resistance to blast loading*, editori: G.C Mays i P.D.Smith, Thomas Telford, 1995, London, str. 72, str. 105.
- [4] *Structures to resist the Effects of Accidental Explosions*, uputstvo TM-5-1300, Department of the Army, 1990, USA.
- [5] *Introduction to Structural Dynamics*, J. Biggs.: McGraw-Hill Book Company, 1964, New York, str.