EKSPERIMENTALNA ANALIZA VITKIH ARMIRANOBETONSKIH ELEMENATA NAPREGNUTIH NA KOSO SAVIJANJE

Radomir ZEJAK

ORIGINALNI NAUČNI RAD
UDK: 624.074.6.001.575 = 861

1. UVOD

Pri projektovanja građevinskih konstrukcija često se primjenjuju pritisnuti armirano–betonski vitki elemenati. Od motiva koji inženjera projektanta navode na traganje za elegantnim konstrukcijskim elementima izdvajaju se: mogućnost primene betona visoke čvrstoće (high concrete) i savremene tehnologije u proizvodnji ab elemenata; smanjenje sopstvene težine, a time i uticaja u elementima; estetski, a vrlo često i ekonomski faktori.

Ovoj oblasti (dvoosno savijani vitki elementi) pripadaju svi vitki štapovi, bilo da su nezavisni ili su dio nekog konstrukcijskog sistema (rešetkasti nosači, ramovski nosači i slično). Tipični predstavnici ovakvih elemenata su stubovi prostornih ramova. Budući da su u armiranom betonu neminovne netačnosti pri izvođenju, a zatim i nesigurnosti prilikom usvajanja proračunskog modela posebno sa porastom vitkosti, razumno je i stubove ravanskih sistema svrstati u ovu kategoriju. Uslovno se ovdje mogu svrstati i vitke grede, kao i površinski nosači koji, zbog lokalnog izbočavanja u svojoj ravni, mogu doći u ovakvo naponsko stanje (visoke grede, zidovi, ljuske i sl...).

Mera kojom se kvantitativno opisuje vitkost nekog elementa jeste faktor vitkosti ili kratko vitkost λ. Vitkost predstavlja geometrijsku karakteristiku elementa koja je definisana izrazom:

$$\lambda_{max} = \lambda_i = l_i / {}_{min} i \qquad (1)$$

gde su, kao što je poznato:

l_i – dužina izvijanja, odnosno rastojanje nultih tačaka dijagrama momenata savijanja,

${}_{min} i = \sqrt{I_b / A_b}$ - poluprečnik inercije punog betonskog presjeka, za dominantni pravac izvijanja.

Imajući u vidu da se granična stanja napona i deformacija kod vitkih elemenata utvrđuju na deformisanom sistemu, neophodan je proračun po teoriji II reda. Teško je na jedinstven način i sistematizovano propisati kriterijume za izdvajanje vitkih konstrukcijskih sistema i elemenata, odnosno kada je, u proračun, potrebno uvoditi efekte teorije II reda. Najbolja ilustracija za ovakav zaključak jeste što najnoviji sistem evropskih propisa Evrokod 2, daje a priori generalno upustvo da se ovi efekti uzimaju u obzir ako se uticaji prema teoriji I reda uvećavaju za više od 10%. [9]. Ovakva konstrukcija kriterijuma izgleda paradoksalno, obzirom da se proračun po teoriji II reda mora ipak sprovoditi radi utvrđivanja eventulnog značajnijeg uticaja (većeg od 10%).

Predmet istraživanja u ovom radu jesu dvoosno ekscentrično pritisnuti stubovi koji zalaze u oblast značajnih vitkosti i kod kojih se efekti teorije II reda moraju uzimati u obzir. Radi kvalitetnijeg sagledavanja osnovnog problema nezaobilazna je analiza poprečnog presjeka za homogeni štap po teoriji elastične stabilnosti.

Posmatra se poprečni presjek prizmatičnog štapa koji je dvoosno ekscentrično pritisnut podužnom silom P=N (slika 1).

Uz pretpostavku da je normalni napon u presjeku proporcionalan odstojanju ***u*** od neutralne ose, iz uslova ravnoteže sila u homogenom presjeku dobija se izraz za normalni napon,

$$\sigma \approx \frac{N}{A} \pm \frac{M_\nu}{I_\nu} * u, \qquad (2)$$

s tim što je prethodno potrebno sračunati vrednosti $M_{\square}$ i $I_{\square}$ vezane za osu (□) u presjeku, koja je paralelna sa neutralnom osom (n-n).

Pravac deformacije-izvijanja ζ=n ovakvog dvoosno ekscentrično pritisnutog štapa je upravan na neutralnu osu (n-n). Poluprečnik inercije za taj pravac iznosi

$$i_\zeta = \sqrt{I_\nu / A} \qquad (3)$$

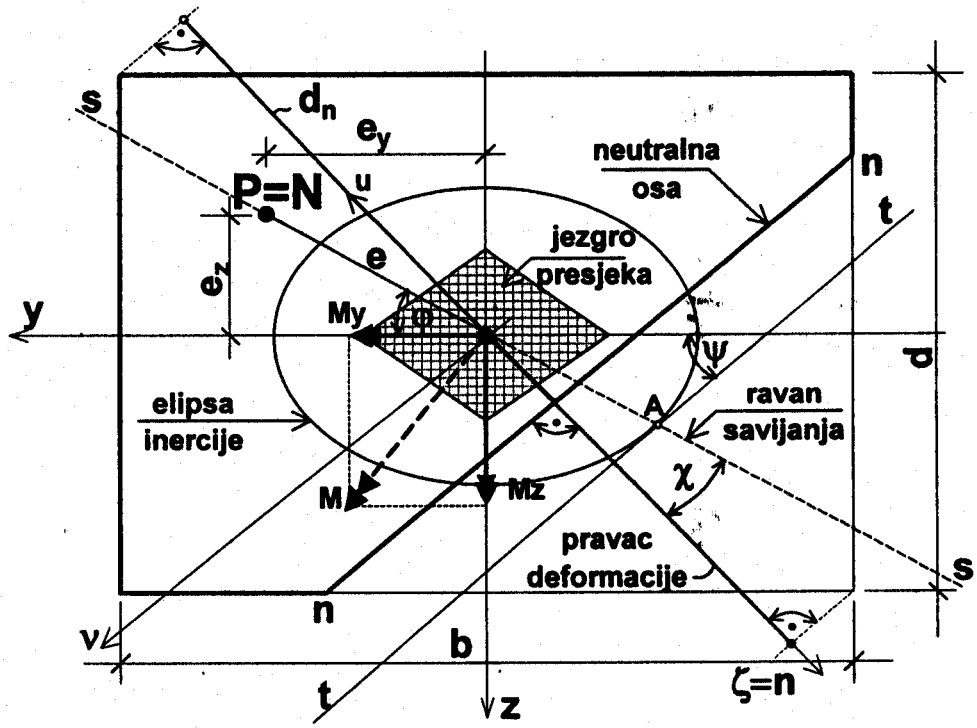
a vitkost štapa koja zavisi od položaja napadne tačke podužne sile P, iznosi:

Adresa autora:
Doc. Dr Radomir Zejak, dipl. inž. građ.,
Univerzitet Crne Gore, Građevinski fakultet u Podgorici,
Cetinjski put bb, Podgorica.

$$\lambda_n = \lambda_\zeta = l_\zeta / i_\zeta \qquad (4)$$

gde se dužina izvijanja može odrediti uobičajenim postupcima teorije elastične stabilnosti, u zavisnosti od oslonačkih uslova štapa. Treba primetiti da u slučaju uvođenja efekata teorije II reda, kao posledica nepoklapanja pravaca savijanja i deformacije (izvijanja) dolazi do rotacije istih u pravcu kraće strane poprečnog presjeka sa porastom sile P.

Ovo je takođe i suštinski problem kod proračuna dvoosno ekscentrično pritisnutih vitkih armirano-betonskih stubova. Ako se imaju na umu problemi sa nepravilnim oblikom pritisnute zone usled složenog kosog savijanja, koja je usled uticaja izvijanja promenljiva veličina, i pri tome uvedu efekti vremenskih deformacija i istorije opterećenja, potpuno je jasno što se problem označava kao izuzetno komplikovan, a određena pojednostavljenja postaju neminovna. Traganje za aproksimativnim i empirijskim izrazima na osnovu podataka dobijenih eksperimentalnim istraživanjima u ovoj oblasti mogu značajno pomoći pri rešavanju ovog složenog zadatka.



Slika 1. Poprečni presjek u stanju ekscentričnog pritiska

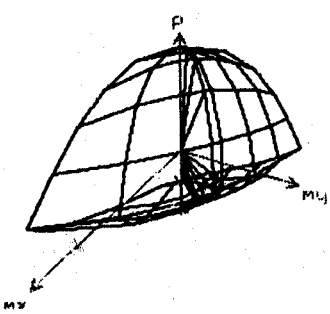
2. GRANIČNA NOSIVOST KOSO SAVIJANOG PRESJEKA

Proračun presjeka koji su napregnuti kosim savijanjem može se u principu sprovesti tačno uz uobičajene proračunske pretpostavke teorije graničnih stanja nosivosti. Moguće je iterativnim postupkom, uz pretpostavljeni poprečni presjek položaja i količine armature, pronaći konačni položaj neutralne ose iz uslova ravnoteže u odnosu na deformisanu osu:

$$\sum N_x = 0; \quad \sum M_{yx} = 0; \quad \sum M_{zx} = 0 \qquad (5)$$

Pri tome treba voditi računa da su u gornjim jednačinama sile u presjeku, koje su dobijene primenom teorije II reda, respektujući njihovu promenu i usled rotacije pravca deformacije ka pravcu kraće strane, tj. relativno brži prirast ugiba u tom pravcu.

Sistematski proračun vodi ka konstrukciji interakcionih površi (slika 2), koje su danas sastavni deo proračunskih algoritama u propisima skoro svih zemalja, najčešće prikazani u odnosu na korake ugla φ ($0<\varphi<90^0$), gde je sa φ označen ugao koju zaklapa ravan savijanja sa y osom, ili u odnosu na korake ugla Ψ ($0<\Psi<90^0$), gde je sa Ψ označen ugao koju zaklapa netralna linija sa y osom.



Slika 2. Interakciona površ za dimenzionisanje koso savijanih presjeka

Sa druge strane, razvojem kompjuterske tehnike i programiranja, većini korisnika su dostupni programski paketi za dimenzionisanje koso savijanih presjeka prema željenim ulaznim pretpostavkama, tj. po propisima raznih

zemalja. U naučne svrhe su takođe razvijeni moćni programski paketi za analizu presjeka (npr. XTRACT i sl.). Ovi programski paketi, uz primenu numeričke integracija sa dovoljnom preciznošću, mogu sračunati naponsko-deformacijsko stanje presjeka sa analizom svih relevantnih parametara. Pri tome mogu biti korišćene konstitutivne veze materijala prema željenom obliku, tj. prema rezultatima koji se dobijaju eksperimentom, odnosno usvojene konstitutivne veze po propisima raznih zemalja, uključujući i naš PBAB 87 [26].

3. SOPSTVENA EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Uvažavajući dosadašnje stanje iskustava, u domenu eksperimentalnih i teorijskih istraživanja autor se opredijelio za izvođenje sopstvenog eksperimenta.

Osnovni cilj eksperimenta predstavljao je utvrđivanje naponsko-deformacijskog odgovora vitkih ab stubova pravougaonog poprečnog presjeka usled dejstva ekscentrične sile pritiska u odnosu na obje glavne centralne ose. Na taj način je moguće uspostaviti odgovarajuću korelaciju u odnosu na savijanje oko jedne glavne ose, što bi omogućilo jednostavniju formulaciju proračunskih metoda.

Pored toga autor je očekivao da će ovim eksperimentom dobiti odgovor na neka značajna pitanja koja su osnova za rešavanje ovog problema a odnose se na:

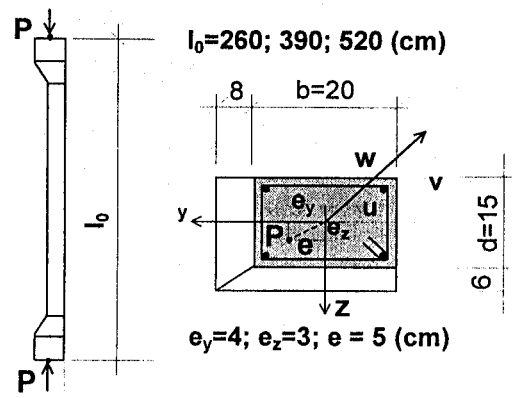
- pad nosivosti usled prirasta vitkosti.
- doprinos podužne armature u porastu nosivosti stuba;
- uticaj vremenskih deformacija smanjuje graničnu nosivost stubova, odnosno uticaj vremenskih deformacija na stabilnost konstrukcije.
- efekat pri utezanju vitkih ab stubova.

Sprovedena eksperimentalna istraživanja na ab vitkim stubovima, u posebno projektovanim uređajima, obezbijedili su odgovarajuće relevantne podatke za odgovore na naznačena pitanja. Istovremeno, ovako dobijeni podaci omogućavaju upoređivanje sa eksperimentalnim rezultatima drugih autora odnosno kritičku analizu proračunskih postupaka.

3.1. Eksperimentalni modeli

Za eksperimentalnu analizu je utvrđena osnovna šema ab modela sa realnim geometrijskim karakteristikama poprečnog presjeka dimenzija b/d=20/15cm i uobičajenim procentima podužne armature (slika 3). Ispitivan je obostrano zglobno oslonjen štap konstantnog poprečnog presjeka, sa varijaciom tri različite dužine i to l_0=260cm, l_0=390cm i l_0=520cm tako da je korespodentna karakteristična vitkost λ=60, λ=90 i λ=120, posmatrano u odnosu na kraću stranu presjeka.

Ekscentricitet sile pritiska se postiže odnosom površine preko koje se aplicira opterećenje i površine poprečnog presjeka, što je obezbijeđeno posebnim oblikovanjem krajeva stuba u zavisnosti od željenog ekscentriciteta.



Slika 3. Ispitivani model stuba

Za usvojene parametre u ovom eksperimentu autor se odlučio na osnovu detaljne analize problema i rezultata teorijskih i eksperimentalnih istraživanja u ovoj oblasti. Prije usvajanja konačnog programa ispitivanja izvršeno je testiranje aparature, mjerne tehnike i samog toka eksperimenta na šest probnih modela. Usvojen je konstantan poprečni presjek po visini stuba tako da je b/d=1.333<1.5, jer se prema mnogim autorima tada efekat kosog savijanja mora uvoditi u proračun bez obzira na položaj normalne sile u presjeku [10]. Na taj način je efekat proučavanog fenomena izrazito dominantan što je od značaja za dobijanje kompletnog realnog odgovora vitkih stubova opterećenih ekscentričnom silom pritiska.

Veličina relativnog ekscentriciteta e/d_k=0.2 uzeta je tako da početni ekscentricitet bude što bliži jezgru presjeka i da je efekat izvijanja značajniji [17]. Ekscentricitet je konstantan i nalazi se u zoni gdje je obavezan detaljan proračun, bez mogućnosti razdvajanja oko glavnih osa, odnosno obavezan prema EC2 i većini nacionalnih propisa. Tri karakteristične vitkosti daju dobar pregled ovog uticaja na graničnu nosivost ab stubova, a njihova primjena u praksi je uobičajena. U okviru ove tri grupe modela varira se procenat podužne armature i procenat poprečne armature-uzengija. Usvojeni procenti armiranja podužnom i poprečnom armaturom najčešće su u primjeni i takođe daju dobar pregled u pogledu prirasta nosivosti za koso savijane vitke stubove.

Za armiranje podužnom armaturom eksperimentalnih modela korišćena je RA 400/500, a za poprečnu armaturu - uzengije GA 240/360. Upotrijebljeni betonski čelik je uzet iz Željezare Nikšić. Agregat za beton je korišćen iz rijeke Morače sa lokacije "Ponari" udaljene oko 12 km od Podgorice. Upotrijebljena mješavina agregata sadrži četiri frakcije i to: 0-4; 4-8; 8-16 i 16-32mm. Cement za spravljanje betonske mješavine je sa oznakom PC 30dp 35 S – iz fabrike Kosijerić. Voda za spravljanje betonske mješavine uzeta je iz gradske vodovodne mreže u Podgorici.

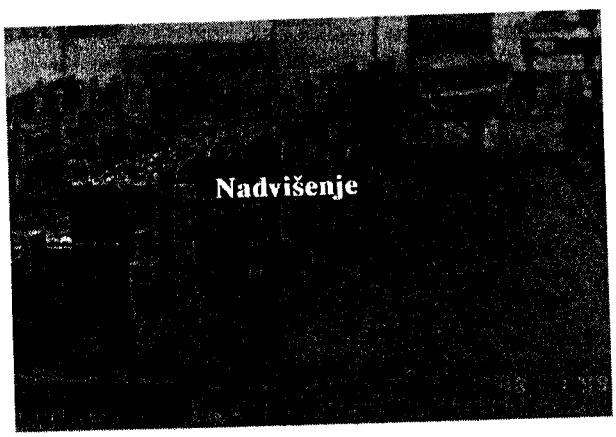
3.2. Izrada eksperimentalnih modela

Spravljanje betona je izvršeno u fabrici betona "Cijevna-komerc" u Podgorici, koja je udaljena oko 3 km. Transport svježeg betona je obavljen automikserom do laboratorije na Građevinskom fakultetu - Podgorica gdje

su betonirani stubovi i sva kontrolna betonska tijela. Za kompaktiranje betona je korišćen pervibrator sa prečnikom igle od 50 mm. Stubovi i uzorci su betonirani u tri serije.

Betonska mješavina za izradu modela i kontrolnih uzoraka, za sve tri serije, je projektovana sa istim karakteristikama u pogledu granulometrijskog sastava, vrste i količine cementa kao i vodocementnog faktora. Budući da je spravljanje betona vršeno u fabrici, očekivane su neminovne razlike karakteristika betonskih mješavina za ove tri serije, iako je poštovana ista procedura za spravljanje i ugrađivanje betona. Konzinstencija svježeg betona kontrolisana je za svaku mješavinu na mjestu ugrađivanja i konstatovana je plastična konzistencija sa slijeganjem konusa 8 do 9 cm.

Ugrađivanje je izvršeno u pripremljenim kalupima od "blažujke" - oplate debljine d=20 mm. Oplata je bila fiksirana za pod laboratorije i geodetski nivelisana kako bi se izbjegao uticaj neželjene ekscentričnosti na modelima, tj. stubovima čija se dužina kreće i do 520 cm.



Slika 5. Detalj iz Laboratorije; nadvišenje betona

S obzirom da je betoniranje obavljeno u horizontalnom položaju, izveden je nadsloj visine jednake vertikalnoj dimenziji poprečnog presjeka stuba (d=15 cm). Odmah nakon kompaktiranja betona ovaj nadsloj se uklanja i vrši završna obrada-perdašenje gornje površine. Na ovaj način se izbjegava nehomogenost u presjeku s obzirom na položaj i pravac prilikom betoniranja i obezbjeđuje ujednačenost betonske mješavine po čitavom presjeku (slika 5). Njegovanje svih stubova i kontrolnih betonskih tijela obavljeno je na isti način za sve tri serije. Nakon ugrađivanja beton je održavan 24 sata u laboratorijskim uslovima visoke relativne vlažnosti i na temperaturi od oko 15 °C, poslije čega su modeli oslobađani od bočnih oplata. U narednih 5 dana nastavljeno je laboratorijsko njegovanje uz održavanje temperature sredine i visoke vlažnosti poslije čega su uzorci dopremani na radne stolove za opremanje mjernim mjestima.

3.3. Program ispitivanja

Za svaki ab stub utvrđen je program eksperimentalnih ispitivanja koji sadrži dispoziciju modela mjernih mjesta i opterećenja, kao i način registrovanja podataka i predstavlja poseban dokumenat programa. Program eksperimentalnih istraživanja je obuhvatio:

a) Probna ispitivanja 3 umanjena modela stuba (M1, M2 i M3) za jedan karakterističan slučaj geometrije i dispozicije opterećenja. Ispitivanje realizovano u 1995. godini.

b) Probna ispitivanja 3 realna modela stuba (S_o1, S_o2 i S_o3) za jedan karakterističan slučaj geometrije i dispozicije opterećenja. Ispitivanje realizovano u 1998. godini.

c) Ispitivanje 22 realna modela ab stubova pri kratkotrajnom opterećenju do loma, sa nanošenjem opterećenja pri starosti od oko 28 dana i ispitivanje 8 realnih modela ab stubova na uticaj vremenskih deformacija u trajanju oko jedne godine.

d) Ispitivanje serije standardnih kontrolnih betonskih tijela (kocke, prizme, cilindri) pod uticajem kratkotrajnog opterećenja za određivanje svih relevantnih osobina betona.

e) Ispitivanje serije standardnih kontrolnih prizmi pod uticajem dugotrajnog opterećenja za određivanje svih relevantnih naponsko-deformacijskih osobina betona kroz vrijeme.

f) Ispitivanje serije standardnih kontrolnih epruveta armature, koja će se koristiti u eksperimentu, za određivanje relevantnih naponsko-deformacijskih osobina armature.

Svi ab stubovi sa kratkotrajnim i dugotrajnim opterećenjem su ispitani u uređajima koji se nalaze u laboratoriji za materijale i konstrukcije Građevinskog fakulteta u Podgorici. Sva kontrolna mjerenja na epruvetama od betona i armature obavljena su takođe u istoj laboratoriji. Radi upoređenja pojedinih parametara izvršeno je ispitivanje vremenskih karakteristika betona u kvazi konstantnim termohigrometrijskim uslovima u laboratoriji Građevinskog fakulteta u Beogradu.

Izvršena su sledeća mjerenja na modelima:

- Dilatacije u podužnoj armaturi stuba korišćenjem mehaničkog deformetra "Pfender" tačnosti 1/1000 mm i baze 100 mm sa sve četiri strane stuba, prema utvrđenoj šemi.
- Dilatacije u betonu po cijeloj visini stuba deformetrom "Pfender" tačnosti 1/1000 mm i baze 100 mm, kao i dodatna, pomoću dilatomjera na bazi od 200 mm sa svih strana.
- Deformacije stuba (ugib) ugibomjerom tačnosti 1/100 mm prema utvrđenoj šemi.
- Ugao rotacije na krajevima stuba preko ugibomjera tačnosti 1/100 mm.
- Dodatna mjerenja relativnog ugiba ose stuba u odnosu na gumenu nit preko digitalnog mjerača dužine, u 5 karakterističnih presjeka po visini stuba.

Mjerenja su vršena nakon nanošenja opterećenja u inkrementima, sve do loma.

Eksperimentalna istraživanja je pratila serija standardnih kontrolnih uzoraka za utvrđivanje mehaničkih karakteristika ugrađenog betona i armature, koji se izrađuju pri betoniranju svake serije stubova, a na njima su vršena sledeća ispitivanja:

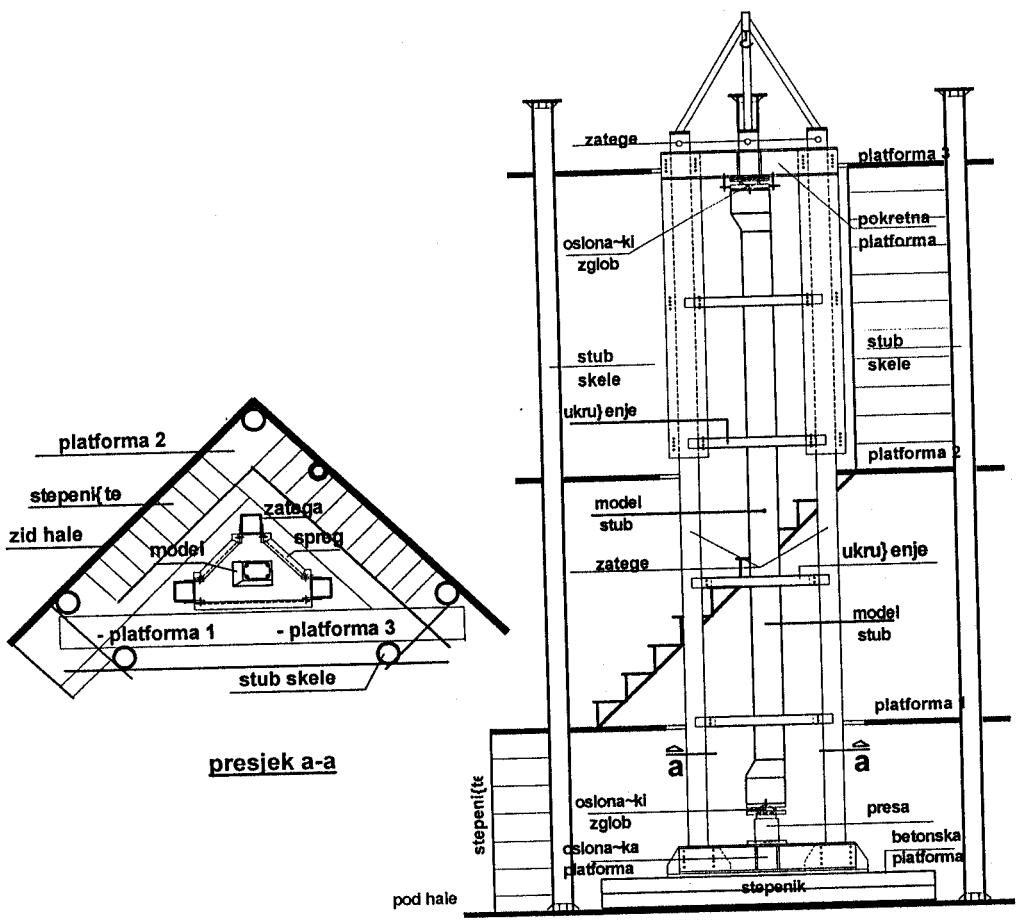
<u>beton:</u>

- čvrstoća betona pri pritisku, savijanju i cijepanju
- modul elastičnosti betona
- radni dijagram betona
- koeficijent tečenja betona

armatura:
- karakteristična granica razvlačenja i granica kidanja
- modul elastičnosti
- standardno izduženje δ (%) na mjernoj bazi od 10ϕ
- radni dijagram čelika

3.4. Aparatura za ispitivanje i mjerna tehnika

Za ispitivanje stubova pod dejstvom kratkotrajnog opterećenja konstruisan je poseban uređaj (slika 6), koji omogućava apliciranje sile do loma u vertikalnom položaju i to za tri različite visine stuba. Uređaj predstavlja zatvoreni sistem u obliku čeličnog prostornog rama sa tri zatege, koje su u osnovi raspoređene u tjemenima jednakokrakog pravouglog trougla. Na mjestima oslonaca sa ab modelom formirani su sferni zglobovi preko dvostrukog tankog teflonskog sloja čime se eliminiše sila trenja. Za fiksiranje tačnog dejstva sile pritiska i obezbjeđenja planiranog ekscentriciteta na oslonačkoj čeličnoj ploči je formiran mali klin (ϕ/h=20/10mm). Ovaj klin, prilikom montaže stuba u vidu moždanika, ulazi u otvor (ϕ/h=22/15 mm) formiran na oslonačkoj glavi stuba. Na ovaj način se, takođe, postiže dobra vertikalnost ispitivanog modela. Šest stubova "blizanaca" umjerene vitkosti λ=60 ispitani su u posebnim uređajima (slika 7) u kojima se, preko sistema poluga, nanosi dugotrajno konstantno opterećenje. Nakon godinu dana stubovi su opterećivani do loma. Za utvrđivanje mehaničkih karakteristika na kontrolnim betonskim tijelima (čvrstoća pri pritisku, čvrstoća na zatezanje pri savijanju, čvrstoća na zatezanje pri cijepanju, radni dijagram betona, modul elastičnosti) korišćena je hidraulična presa nosivosti 250 tona.

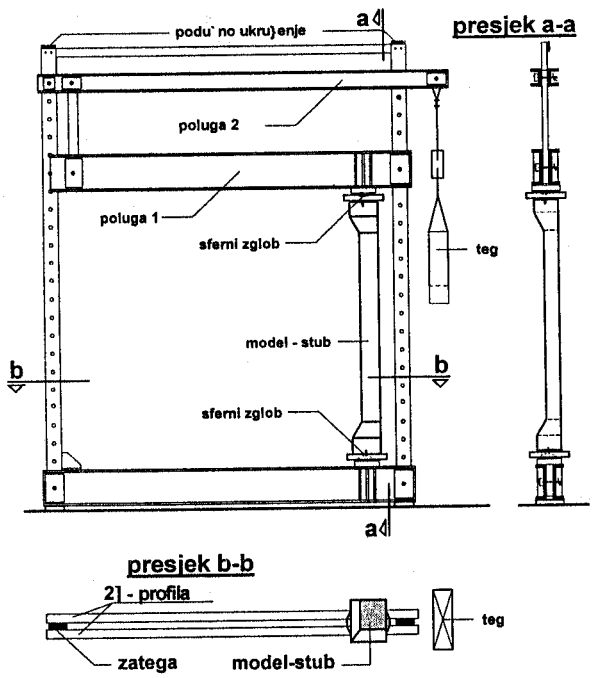


Slika 6. Uređaj za ispitivanje stubova pri kratkotrajnom opterećenju

Za ispitivanje reoloških karakteristika na kontrolnim betonskim tijelima (skupljanje i tečenje betona), u promjenljivim termohigrometrijskim uslovima sredine u kojima su ispitivani i sami stubovi, korišćene su aparature kao na slici 7 sa nešto manjim kapacitetom opterećenja.

Za utvrđivanje mehaničkih karakteristika na kontrolnim uzorcima armature (granica velikih izduženja, granica kidanja, ukupno relativno izduženje, radni dijagram čelika, modul elastičnosti) korišćena je laboratorijska kidalica kapaciteta 100 tona.

Ispitivanje reoloških karakteristika betona tj. skupljanja i tečenja betona u konstantnim termohigrometrijskim uslovima izvršeno je na dvije serije kontrolnih betonskih prizmi 12/12/36 cm u laboratoriji Građevinskog fakulteta u Beogradu.



Slika 7. Uređaj za ispitivanje stubova pri dugotrajnom opterećenju

3.5. Mjerna tehnika

Mjerenje dilatacija u betonu i podužnoj armaturi obavljena su mehaničkim deformetrima tipa "Pfender", sa tačnošću čitanja od 1/1000 mm i bazom od 100 mm. Ova mjerna mjesta su ravnomjerno raspoređena po čitavoj srednjoj trećini dužine štapa. Istovremeno su na betonu vršena dodatna kontrolna mjerenja, u pet karakterističnih presjeka po visini stuba, mehaničkim dilatomjerima, sa bazom od 200 mm i tačnošću 1/1000 mm. Mjerna mjesta na armaturi su postavljena indirektno preko navarenih izvoda koji prodiru kroz zaštitni sloj betona. Pri tome su ovi "izvodi" (štapovi □8mm od glatke armature) odvojeni od okolnog betona navlačenjem gumenih prstenova koji se nakon očvršćavanja betona uklanjaju. Za fiksiranje mjernih mjesta na površini betona i armaturnih izvoda korišćen je specijalni dvokomponentni lijepak čiji je proizvođač "Hotinger" iz Njemačke. Isti lijepak je korišćen i za pričvršćivanje dilatomjera.

Mjerenje ugiba odnosno poprečnih deformacija ose štapa vršeno je ugibomjerima marke "Hugenberger" sa tačnošću od 1/100 mm, koji su postavljeni u pet presjeka po visini stuba i na sve četiri strane. Pri tome su isti postavljeni na uređaju za ispitivanje modela. Iz tih razloga su postavljeni i reperni ugibomjeri kojima se pratilo eventualno bočno pomjeranje aparature.

Mjerenje sile, koja se aplicira na ispitivani model do loma, vršeno je preko mehaničkog mjerača sile sa tačnošću od 0.5 KN. Istovremeno je na početku eksperimenta vršeno kontrolno mjerenje deformacija na čeličnim zategama uređaja. Ovo indirektno mjerenje veličine spoljašnjeg opterećenja je kasnije napušteno s obzirom na dobro poklapanje rezultata. Mjerna mjesta za sva mjerenja ugiba postavljaju se simetrično na obje strane stuba kako bi se postiglo takozvano opasivanje presjeka. Na taj način jedan od dobijenih podataka uvijek predstavlja kontrolni na osnovu kojeg se može ustanoviti greška izmjerenih veličina. Istovremeno je uz sve četiri ivice postavljen tanki gumeni konac koji je služio za grubu kontrolu pomjeranja i davao dobru vizuelnu sliku po visini deformacione linije stubova.

Registrovanje pojave i širine prslina vršeno je na modelima sa kratkotrajnim opterećenjem u inkrementima kao i na modelima sa dugotrajnim opterećenjem u vremenskim intervalima kada su mjerene i ostale veličine. Mjerenje širine prslina vršeno je lupom i tačnošću od 0.025 mm.

Mjerenja okretanja oslonaca u osnovi vršeno je u početku ugibomjerima postavljenim na sve četiri strane. Kako mjerenjem nije ustanovljena rotacija stuba oko svoje ose, ovo mjerenje je kasnije napušteno. Takođe je vršeno redovno mjerenje temperature i vlažnosti sredine u laboratoriji u kojoj su smješteni uređaji za ispitivanje i ispitni modeli, odnosno gdje je u cjelini obavljen eksperimenat.

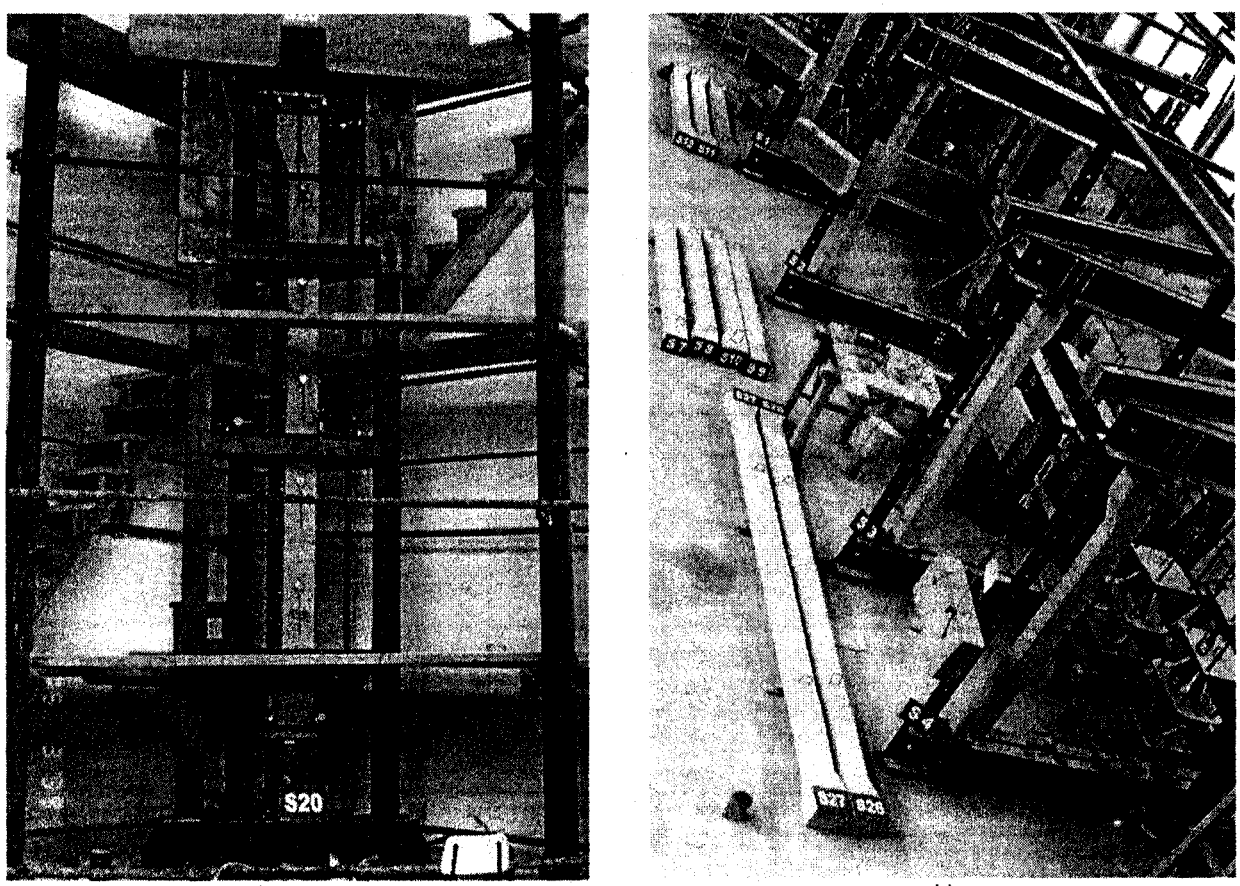
3.6. Tok eksperimenta

Eksperimentalni modeli su, nakon opremanja sa mjernim mjestima, dopremani pored uređaja za kratkotrajna ispitivanja. Montiranje u uređaj za ispitivanje, geodetsko nivelisanje i postavljanje mjernih instrumenata sa zatvaranjem uređaja za ispitivanje, vršeno je dan prije ispitivanja odgovarajućeg modela.

Za ispitivanje jednog modela (slika 8a) bio je potreban jedan dan, pri čemu je nanošenje opterećenja do loma trajalo oko 10 sati, pa se može smatrati da je aplicirano opterećenje, uslovno, kratkotrajnog karaktera. Prije početka eksperimenta vršeno je tzv. nulto čitanje na instrumentima pri tehničkom nivou opterećenja od 5.0 kN. Zatim je opterećenje nanošeno u inkrementima od 50 kN u početku, a zatim od 25 KN, s tim što je, u oblasti pred lom, ovaj inkrement polovljen. Na ovaj način se dobija dobar pregled stanja napona i deformacija ispitivanog modela. Brzina nanošenja opterećenja, u inkrementu, bila je 2.0 kN/s.

Mjerenja su vršena oko 5 minuta poslije nanošenja opterećenja radi eventualnog stabilizovanja deformacija. Pri kasnijim inkrementima, s obzirom na dužinu trajanja opterećenja vršena je, u toku čitanja podataka, po potrebi korekcija aplicirane sile pritiska. Može se konstatovati da je pad sile u tom intervalu bio zanemerljivo mali i registrovan je maksimalni pad manji od 0.5% od sile. Svi podaci su direktno unošeni u računar u pripremljene tabele korišćenjem programskog paketa EXCEL. Tako je bilo omogućeno posredno da se, u toku eksperimenta, prate određeni dijagrami zavisnosti na ekranu i interveniše kod sumnjivih mjerenja. Svi izmjereni podaci su čuvani na diskovima i štampanom materijalu, koji su formirani uvijek neposredno poslije završetka ispitivanja odgovarajućeg modela. Istog dana je vršena demontaža polomljenog modela, kontrola ispravnosti uređaja i mjerne tehnike za ispitivanje, kao i sve potrebne pripreme za postavljanje sledećeg ispitnog modela. Stubovi (šest modela □=60) koji su ispitivani na uticaj dugotrajnog opterećenja montirani su u odgovarajuće uređaje (slika 8b). Mjerenja su vršena na početku (tehnička nula) i na kraju nanošenja ukupnog eksploatacionog opterećenja. Zbog tehničkih

nedostataka aparature za nanošenje dugotrajnog opterećenja u ovom eksperimentu, nije postojala mogućnost za precizna mjerenja deformacija i ugiba pri krakotrajnom nanošenju sile pritiska do nivoa eksploatacionog opterećenja. Opterećenje na stubovima je zadržano konstantnim oko godinu dana. U ovom peridu su vršena stalna očitavanja potrebnih podataka radi proučavanja efekata tečenja betona, prema tačno utvrđenom programu za sve stubove. Ova mjerenja su bila intenzivnija u prvoj nedjelji i prvom mjesecu, dok je registrovanje podataka kasnije značajno redukovano. Zatim su stubovi rasterećeni do nule i nakon demontaže i montaže ovih modela u uređaj za kratkotrajna ispitivanja, sproveden je postupak ispitivanja analogno modelima za kratkotrajno ispitivanje. Ova procedura se odnosi na šest stubova vitkosti □=60 koji su imali svoje identične neopterećene parnjake. Dva stuba vitkosti □=120 opterećena su na dugotrajno opterećenje od oko 100 dana, pri čemu je opterećenje nanošeno preko hidraulične prese koja se može mehanički zaključavati tako da je opterećenje kvazi konstantno, s obzirom da spoljašnje opterećenje ne prati deformaciju, pa se pad sile u toku vremena morao u koracima nadoknaditi. Poslije planiranog vremena jedan od stubova nije rasterećivan, već je nastavljeno sa nanošenjem kratkotrajnog opterećenja u inkrementima do loma.Svi rezultati ispitivanja se mogu naći u literaturi [23].



a) b)

Slika 8. Modeli u uređajima za a) kratkotrajno b) dugotrajno ispitivanje

4. ANALIZA SOPSTVENIH EKSPERIMENTALNIH ISTRAŽIVANJA

Na osnovu podataka dobijenih mjerenjem konstruisani su osnovni dijagrami ***P-u*** iz kojih se mogu sagledati promjene stanja napona i deformacija pri porastu aksijalne sile pritiska u inkrementima do loma, za sve ispitivane modele. Za 8 ispitivanih stubova praćena je promjena stanja napona i deformacija u toku vremena pri konstantnom spoljašnjem opterećenju. Pri tome je poprečni presjek stuba b/d=15/20 cm ostao nepromjenljiv, a varirani su sledeći parametri.

- λ - vitkost štapa (tri vrijednosti)
- e_y/e_z - odnos ekscentriciteta (tri vrijednosti)
- μ_a - procenat podužne armature (jedna + tri vrijednosti)
- μ_u - procenat poprečne armature (dvije vrijednosti)
- f_b - čvrstoća betona (prirodni parametar koji se ne može eliminisati).

Prilikom koncipiranja ovih istraživanja akcenat je bio dat na dobijanju kompletnog odgovora pritisnutih vitkih ab stubova pri kosom savijanju, uz upoređenje sa pravim savijanjem aksijalnom silom pritiska. Zato se kod drugog parametra, koji uvodi ekscentričnost sile pritiska, morao analizirati slučaj centričnog pritiska i pravog složenog savijanja oko glavnih centralnih osa inercije. Otuda je i broj analiziranih uticajnih parametara postao znatno

visok u odnosu na ukupni statistički uzorak od n=30 modela. Dijagrami zavisnosti kojima se prezentiraju pojedini uticajni parametri u ovom poglavlju, moraju se posmatrati u tom kontekstu. U tabeli 2 se daju najvažniji rezultati ispitivanja, sa osnovnim karakteristikama modela koji su ispitivani u ovom eksperimentu. Prikazane su izmjerene sile loma i maksimalne deformacije u sredini stuba za y i z pravac.

Tabela 2. Osnovne karakteristike ispitivanih stubova i najvažniji rezultati ispitivanja

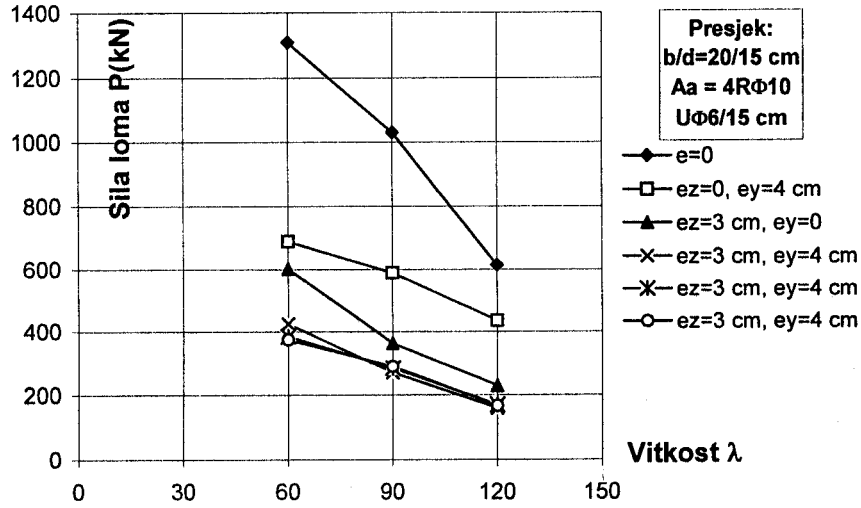
Redni Broj	Oznaka stuba	Ekscentričnost opterećenja	Podserija Stubova	Pod.arm. μ (%)	Pop.arm. μ_u (%)	Sila loma Pu (kN)	$_{max}u_y$ (cm)	$_{max}v_z$ (cm)
SERIJA-1 λ = 60; b/d = 20/15 = const k=(e_y/b)/(e_z/d) = (0;∞;1) e = 5 cm								
1	S 1 *	centrično	S-1	1.05	0.25	1275	0.27	0.38
2	S 2 *	oko z ose e_z=4 cm	S-1	"	"	605	0.74	1.35
3	S 3 *	oko y ose e_y=3 cm	S-2	"	"	555	0.05	2.08
4	S 4 *	oko z i y osa e=5cm	S-2	"	"	345	1.48	2.25
5	S 5 *	"	S-3	2.05	"	355	1.22	1.87
6	S 6 *	"	S-3	"	0.50	365	1.20	2.23
7	S 7	centrično	S-1	1.05	0.25	1310	0.49	0.20
8	S 8	oko z ose e_z=4 cm	S-1	"	"	690	0.70	1.04
9	S 9	oko y ose e_y=3 cm	S-2	"	"	603	0.12	1.55
10	S 10	oko z i y osa e=5cm	S-2	"	"	425	0.69	0.90
11	S 11	"	S-3	2.05	"	385	0.96	1.50
12	S 12	"	S-3	"	0.50	375	0.85	1.78
SERIJA-2 λ = 90; b/d = 20/15 = const k=(e_y/b)/(e_z/d) = (0; ∞;1) e = 5 cm								
13	S 13	centrično	S-1	1.05	0.25	1030	0.79	1.06
14	S 14	oko z ose e_z=4 cm	S-1	"	"	590	0.20	2.48
15	S 15	oko y ose e_y=3 cm	S-1	"	"	363	0.08	4.00
16	S 16	oko z i y osa e=5cm	S-2	2.05	0.50	290	1.38	2.68
17	S 17	"	S-2	1.05	0.25	270	0.91	2.22
18	S 18	"	S-2	2.05	"	285	1.52	3.70
19	S 19	"	S-3	5.07	0.25	375	1.35	3.30
20	S 20	"	S-3	"	0.50	385	1.49	4.12
21	S 21	"	S-3	"	1.00	390	1.35	3.29
SERIJA-3 λ = 120; b/d = 20/15 = const k=(e_y/b)/(e_z/d) = (0; ∞;1) e = 5 cm								
22	S 22	centrično	S-1	1.05	0.25	615	0.33	1.94
23	S 23	oko z ose e_z=4 cm	S-1	"	"	435	2.99	0.60
24	S 24	oko y ose e_y=3 cm	S-1	"	"	230	0.07	3.33
25	S 25	oko z i y osa e=5cm	S-2	2.05	"	220	1.82	3.36
26	S26 *	"	S-2	"	"	183	1.95	4.29
27	S 27	"	S-3	"	0.50	168	2.00	4.17
28	S 28	"	S-3	1.05	0.25	160	1.62	2.74
29	S 29	"	S-2	"	"	170	2.21	3.47
30	S 30 *	"	S-3	2.05	0.50	155	2.00	5.59

* - *Modeli koji su opterećeni dugotrajnim opterećenjem*

4.1. Pad nosivosti presjeka u odnosu na vitkost

Ovaj parametar je istraživan i ima teorijsku podlogu još od Euler-ovog doba. Savremena eksperimentalna istraživanja ovog parametra uglavnom su sprovođena u odnosu na pravo savijanje, dok se mali broj istraživača bavio ovim parametrom u odnosu na koso savijanje. Na slici 9 prikazani su rezultati sa apsolutnim vrijednostima koji su dobijeni u ovom eksperimentu za pojedine karakteristične slučajeve u odnosu na veličinu početnog ekscentriciteta sile pritiska.

Za relativnu početnu ekscentričnost stubova u odnosu na odgovarajuće strane poprečnog presjeka $e_z/d=e_y/b=e/d_k=0.2$ najmanja granična nosivost stubova se dobija kod koso savijanih stubova u svim ispitivanim slučajevima (λ=60; 90; 120).



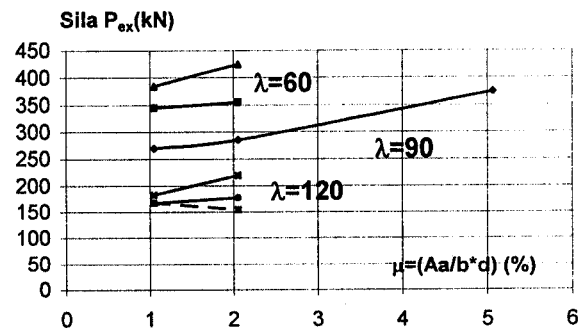
Slika 9. Pad nosivosti usled prirasta vitkosti stuba

Rezultati dobijeni na centrično pritisnutim stubovima za varirane vitkosti sa svim manifestacijama do loma ukazuje na slučaj gubitka stabilnosti I vrste. Iznenadni krti lom na sredini stuba uz jaki prasak istovremeno je indikator za dobro postavljen sistem i funkcionalnost aparature za ispitivanje. Kod svih stubova, neposredno pred lom, uočen je brži prirast ugiba u pravcu kraće strane, a što se posebno ističe kod konačne figure loma i stubova veće vitkosti.

Odabrane grupe stubova su istih fizičko–mehaničkih i geometrijskih karakteristika, u pogledu čvrstoće pri pritisku betona, dimenzija poprečnog presjeka, kao i procenta podužne i poprečne armature i pri tome pripadaju serijama koje su betonirane zajedno. Tako se, variranjem vitkosti za bilo koju dispoziciju opterećenja, dobija očekivani pad nosivosti usled povećanja vitkosti. To nam istovremeno predstavlja potvrdu i ukazuje na pouzdanost dobijenih rezultata ispitivanja pomoću kojih se može dalje pratiti istraživani odgovor u ponašanju koso savijanih vitkih stubova.

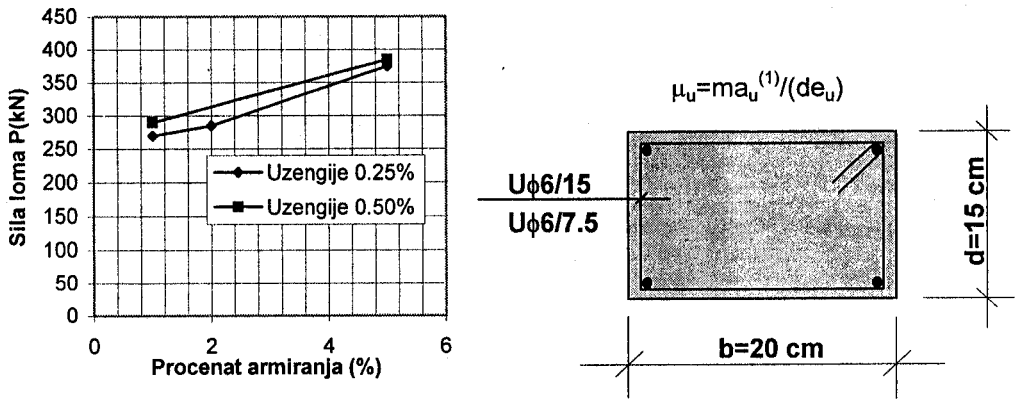
4.2. Porast nosivosti presjeka u odnosu na procenat armature

Za analizu uticaja ovih parametara na raspolaganju su po dva procenta armiranja za vitkosti λ=60 i λ=120 i tri procenta armiranja podužnom, odnosno poprečnom armaturom, za vitkost λ=90. Na osnovu prethodnih sopstvenih računskih analiza u pogledu nosivosti presjeka izražena je sumnja u tako veliki doprinos podužne armature. Otuda je ovaj parametar postao interesantan za eksperimentalno istraživanje. Na slici 10 prikazana je ova zavisnost.



Slika 10. Prirast nosivosti usled povećanja podužne armature

Evidentan je prirast nosivosti sa povećanjem procenta podužne armature, a na sličnom dijagramu se uočava da uticaj poprečne armature ipak nije beznačajan (slika 11). Za sve ispitivane modele evidentan je porast nosivosti sa povećanjem procenta glavne podužne armature, pri tome je procenat poprečne armature (uzengija) bio konstantan za modele koji se upoređuju. Kod stubova sa nižim procentom armiranja, odnosno tanjim profilima, pri lomu dolazi do izbočavanja profila između susjednih uzengija i to u pravcu deformacije stuba.



Slika 11. Prirast nosivosti usled povećanja podužne armature za različita rastojanja uzengija

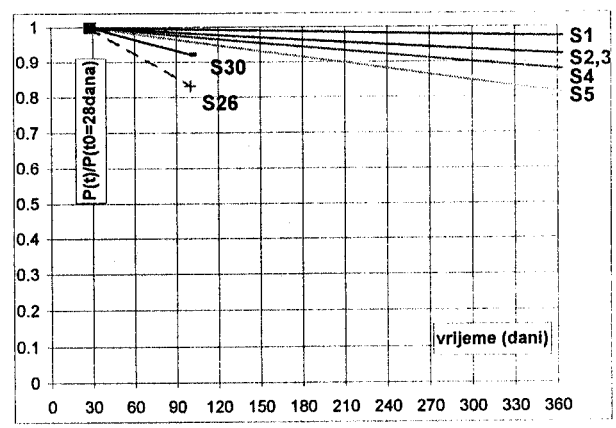
Prisustvo uzengija sa manjim razmakom (e_u=7.5 cm) umanjuje ovaj efekat. U slučaju debljih profila, odnosno većeg procenta podužne armature, ne dolazi do izbočavanja ovih profila prema vani, posmatrano u odnosu na poprečni presjek, već dolazi do njihovog oštrog savijanja u pravcu deformacije stuba. Naime krutost debljih profila (Rϕ22) je bila takva da je lokalno izbočavanje šipki između uzengija bilo spriječeno i pri tome nije došlo do otvaranja uzengija. Dolazi do jakog oštećenja pritisnutog betonskog presjeka i velikih deformacija koje izazivaju ovaj efekat previjanja šipki u istom smjeru u kojem se manifestovao mehanizam loma.

Za treću seruju (λ=120) vršeno je upoređivanje između stubova koji su različito tretirani u odnosu na proces nanošenja opterećenja. Isprekidana linija, na slici 10, prikazuje slučaj kratkotrajnog odnosno dugotrajnog opterećenja (oko tri mjeseca) stubova istih karakteristika, zato je izvršena njena korekcija prema analizi koja tretira dugotrajno opterećene stubove.

4.3. Analiza ponašanja stubova pri dejstvu dugotrajnog opterećenja

Posebna pažnja je poklanjena analizi rezultata ispitivanja usled dugotrajnog dejstva konstantnog opterećenja, gdje je evidentan pad nosivosti u odnosu na kratkotrajno opterećene stubove. Prikaz svih rezultata ispitivanja, zbog obima, nije dat u ovom radu, ali se može naći u literaturi [23].

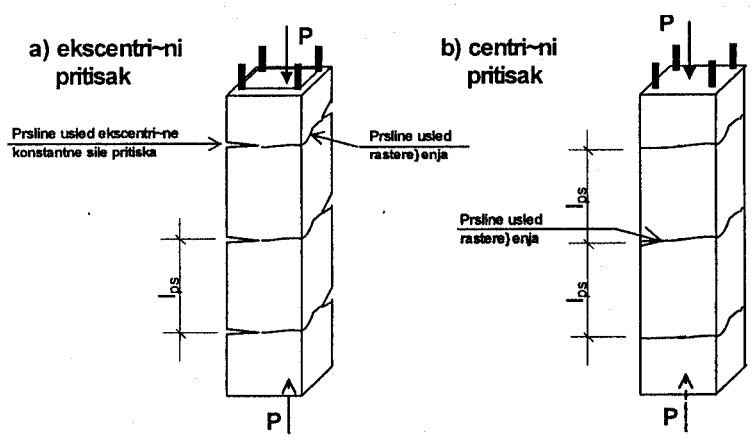
Problem granične nosivosti vitkih ab stubova, pri dejstvu dugotrajnog konstantnog opterećenja, u uslovima visokog nivoa napona od oko $0.5f_b$ bio je predmet proučavanja u ovom radu. Na osnovu rezultata ispitivanja na šest pari modela vitkosti λ=60 i dva para iz serije vitkosti λ=120 mogu se, sa dovoljnom pouzdanošću, donijeti određeni zaključci. Iako su brojna ispitivanja na raznim ab elementima, usled dejstva dugotrajnog opterećenja, najčešće pokazivala nepromijenjenu ili čak i povećanu graničnu nosivost u odnosu na kratkotrajno opterećene "blizance", ovdje je pad granične nosivosti evidentan, imajući na umu oblik ispitivanog elementa (vitak stub). Fenomen povećanja čvrstoće elemenata koji su bili izloženi dugotrajnom opterećenju pritiska, usled poboljšanja kompaktnosti, u odnosu na neopterećene "blizance" [20], ovdje ne može doći do izražaja, s obzirom da u toku vremena dolazi do promjene naponsko–deformacijskog stanja. Prirast vremenskih deformacija, koji je posledica prevashodno uticaja tečenja betona izaziva veće krivljenje deformisane figure stubova (efekti teorije II reda), koja za posledicu ima smanjenje vrijednosti granične nosivosti. Na sledećem dijagramu (slika 12) prikazan je pad granične nosivosti usled dugotrajnog opterećenja stubova istih karakteristika u odnosu na kratkotrajno opterećene stubove. Treba napomenuti da su svi "blizanci" bili opterećeni do loma pri istoj starosti. Uticaj skupljanja betona se, pri tome, ne razmatra, budući da su obezbijeđeni isti uslovi sredine i njegovanje betona. Ako se isključi jedan podatak za centrično opterećeni stub i podatak za par modela sa oznakama (S6, S12), čiji rezultat je nepouzdan zbog loma modela S6 koji se dogodio slučajno u toku provjere apliciranog konstantnog tereta pri starosti od oko 8 mjeseci, onda se statističkom obradom dolazi do vrijednosti od oko 12% (7-17(%)) za pad nosivosti usled dugotrajnog dejstva optrerećenja. Pad sile za svega 3% kod centrično opterećenih stubova takođe ide u prilog tezi koja je široko istraživana u svijetu [20].



Slika 12. Pad nosivosti stubova usled tečenja betona

Takođe je evidentno da je pad sile pri dejstvu dugotrajnog opterećenja mnogo brži za oblast visokih vitkosti zbog uvećanih efekata teorije II reda. Na osnovu podataka iz ovog eksperimenta, brzina pada sile usled dugotrajnog dejstva opterećenja, za modele iz serije λ=120, veća je za oko tri puta u odnosu na modele iz

serije čija je vitkost λ=60. Ovim se pokazuje da za veoma vitke stubove, koji su ekscentrično opterećeni u eksploatacionim uslovima, postoji opasnost, ne samo da prekorače granična stanja upotrebljivosti, već da mogu biti dovedeni i u granično stanje loma u toku vremena. Kako je aparatura za nanošenje dugotrajnog opterećenja na stubovima, koja je konstruisana u vidu dvostruke poluge, bila nepodesna za nanošenje tereta do loma, to se moralo pristupiti rasterećenju modela neposredno pred lom. Osnovni razlog je veliko pomjeranje kraka poluge 2 po visini (slika 7), na koju se kači teret i nedovoljan prostor za njen hod po visini unutar hale u kojoj su uređaji postavljeni. Prilikom rasterećenja stubova uočen je jedan veoma interesantan fenomen za armirano betonske pritisnute elemente u toku vremena. Kod svih modela, uključujući i centrično pritisnuti stub, došlo je do pojave prslina po čitavom presjeku u toku rasterećenja. Akumulirana elastična energija (krutost elastične opruge) u armaturi izazvala je zatezanje u već konsolidovanom betonu koji je posledica njegovog tečenja. Zaostala deformacija i dio reverzibilne deformacije tečenja, koja se nije mogla ostvariti odmah nakon rasterećenja, kao i deformacija usled zatezanja betona nijesu bile dovoljne da pokriju povratnu elastičnu silu u armaturi. Zato je došlo do pojave prslina ravnomjerno po čitavoj dužini štapa. Kod koso savijanih stubova prsline su nastajale u istim presjecima u kojima su postojale na suprotnim stranama prsline usled zatezanja, koje su sada imale tendenciju zatvaranja, tako da su prsline bile spojene po čitavom presjeku. širina zategnutih prslina poslije rasterećenja je bila 2-3 puta veća od novoformiranih prslina u pritisnutoj zoni presjeka. Razmak i ravnomjerni raspored prslina na centrično pritisnutom stubu poslije rasterećenja je bio skoro identičan sa ostalim modelima, s tim što se prslina približno konstantne širine prostirala po čitavom presjeku (slika 13). Veličina ove prsline, za stub vitkosti λ=60, u prosjeku je iznosila oko 0,1mm.



Slika 13. Karakterističan prikaz pojave prslina u toku eksperimenta nakon rasterećenja

Kako je u postupku opterećivanja i rasterećivanja, na aparaturama za dugotrajno opterećenje, bilo nepouzdano kontinualno pratiti tačan nivo aksijalne spoljašnje sile pritiska, to nijesu mogle biti evidentirane ni tačne vrijednosti sila pri kojima su se prsline pojavljivale.

Odmah poslije rasterećivanja, a neposredno pred lom modela u uređaju za nanošenje kratkotrajnog opterećenja, bilo je moguće pouzdano evidentirati silu pritiska pri kojoj je dolazilo do zatvatanja ovih prslina i na taj način dobiti ovaj veoma interesantan podatak. Izmjerene veličine u ovom eksperimentu pokazuju da je vrijednost tih sila oko 25% od granične sile loma.

Sa druge strane, na kratkotrajno opterećivanim "blizancima" do loma, podaci o veličini sile prilikom pojave prslina, precizno su evidentirani, a koji u prosjeku iznose oko 35–40% od granične sile loma. Pri tome treba imati na umu, da se ove veličine odnose na znatno veću starost stubova (oko godinu dana) u trenutku nanošenja opterećenja. Povećanje fizičko–mehaničkih karakteristika betona u toku vremena predstavlja, čini se, i jedino objašnjenje za razlike u veličini spoljašnje sile pritiska pri pojavi prslina.

Za koso savijane vitke stubove λ=60 i λ=120 može se na osnovu izmjerenih podataka sračunati veličina prirasta ukupnog ekscentriciteta e_φ usled deformacije stuba tokom vremena. Ovaj pokazatelj ovdje direktno može poslužiti za upoređenje sa očekivanim proračunskim vrijednostima e_φ prema metodi dopunske ekscentričnosti. Uočavaju se značajno veće deformacije usled tečenja u odnosu na proračunske. Srednja vrijednost odstupanja u odnosu na proračunsku vrijednost za 5 koso savijanih stubova različitih vitkosti iznosi oko 30%.

Odabrane grupe stubova za analizu pojedinih uticajnih parametara pripadaju serijama koje su betonirane zajedno i imaju iste fizičko-mehaničke i geometrijske karakteristike u pogledu čvrstoće pri pritisku betona, dimenzija poprečnog presjeka, sadržaja podužne odnosno poprečne armature. U želji da se što bolje opiše odgovor sistema broj analiziranih uticajnih parametara u eksperimentu je bio znatno visok u odnosu na ukupni statistički uzorak od 30 modela. Dobijene rezultate i dijagrame zavisnosti između pojedinih parametara treba posmatrati u tom kontekstu, a za eventualne strožije ocjene u pogledu njihovog doprinosa trebalo bi organizovati obimnije eksperimente.

5. EMPIRIJSKI IZRAZI ZA KONAČAN PRAVAC DEFORMACIJE

Proračun koso savijanih pritisnutih presjeka može se sprovoditi prema raznim postupcima manje ili veće tačnosti, u skladu sa zahtjevima koji se postavljaju inženjeru projektantu. To podrazumijeva prevashodno poznavanje tačnijih veličina unutrašnjih sila u presjeku. Kako se proračun ovih sila najčešće sprovodi po linearnoj tehničkoj teoriji savijanja štapova, to u slučaju vitkih stubova, najčešće, nije obezbijeđena zadovoljavajuća tačnost. Za složeno pravo savijanje štapova postoji čitav niz postupaka proračuna konačnih vrijednosti deformacija štapa, tj. konačnih vrijednosti statičkih uticaja [8] (metoda Engesser-Vianelo, metoda moguće ravnoteže, model stuba... i sl.). Ovakvi postupci proračuna, u odnosu na ekscentricitet samo oko jedne ose, su sadržani u savremenim propisima većine zemalja.

Budući da neutralna osa kod kosog savijanja nije upravna na ravan savijanja, već za određeni ugao skreće ka pravcu kraće strane, postupci koji su opisani za koso savijanje silom pritiska ne mogu se direktno primijeniti u ovom slučaju ili zahtijevaju određene modifikacije. Postupak Engesser-Vianello treba modifikovati u smislu promjene fiktivnog opterećenja momentima savijanja oko obje ose i sračunavanja relativnog odnosa deformacija jednog i drugog pravca što prestavlja izazov za inženjere koji se bave pisanjem algoritama za računar, odnosno programiranjem.

Kako je za konačne vrijednosti sila u presjeku kod kosog savijanja potrebno poznavati, u odnosu na pravo savijanje, još samo jedan parametar, tj. ugao rotacije neutralne ose χ, autor je pokušao da na prikladan način parametarskom analizom dođe do empirijskog izraza za njegov proračun, odnosno da odredi konačni pravac deformacije.

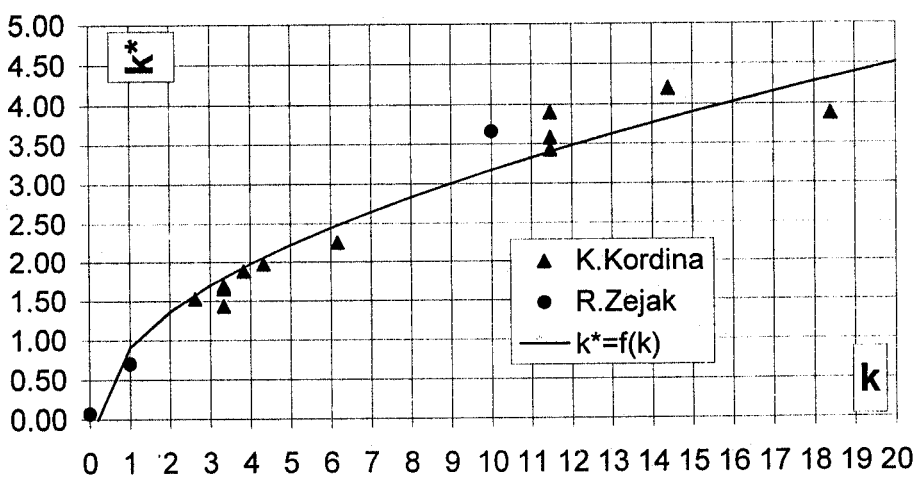
5.1. Početni ekscentricitet i dimenzije presjeka

Iz jednostavnih matematičkih i fizičkih interpretacija dobro je povezati parametre odnosa ekscentriciteta i odnosa strana poprečnog presjeka preko relativnih ekscentriciteta i njihovog odnosa,

$$k = \frac{\frac{e_y}{b}}{\frac{e_z}{d}} = \frac{e_y}{e_z} \cdot \frac{d}{b}; \qquad (6)$$

gdje je b duža strana u pravcu y ose sa ekscentricitetom e_y u tom pravcu. Na taj način vrijednost **k** predstavlja osnovni polazni parametar za predmetnu analizu.

Na osnovu analize velikog broja rezultata teorijskih istraživanja došlo se do okvirne zakonitosti u pogledu promjene ugla rotacije χ (slika 1). Sa druge strane eksperimentalni podaci koji su bili na raspolaganju autoru, kao i sopstveni rezultati eksperimentalnih istraživanja, poslužili su autoru za jednu parametarsku analizu, uz respektovanje teorije vjerovatnoće i matematičke statistike, za definisanje empirijskog izraza oblika $k^*=f[k(\chi)]$. Na taj način se može dobiti konačan pravac deformacije k^* i stvarni statički uticaji za dimenzionisanje u slučaju složenog kosog savijanja presjeka. Jedan od statistički analiziranih slučajeva prikazan je na slici 14, sa naznačenom emprijskom krivom.



Slika 14. Regresiona analiza dobijenih rezultata za bezdimenzioni koeficijent k

Za slučajeve unutar oblasti $0.2 \le k \le 5.0$ dobija se sledeći empirijski izraz:

$$k^* = f(\chi) = 1{,}12 \cdot \sqrt{k - 0.2} \cdot e^{\frac{\lambda - 150}{100}}; \qquad (7)$$

Ovaj izraz daje dobre rezultate za slučaj ravnomjerno raspoređene armature po obimu koso savijanog presjeka, dok se, za česti slučaj iz prakse, ako je cjelokupna armatura smještena uz ivicu kraće strane, autor ove disertacije predlaže modifikovani izraz:

$$k^* = f(\chi) = 1{,}12 \cdot (1 + \frac{\mu_a}{100}) \sqrt{k - 0.2} \cdot e^{\frac{\lambda - 150}{100}}; \qquad (8)$$

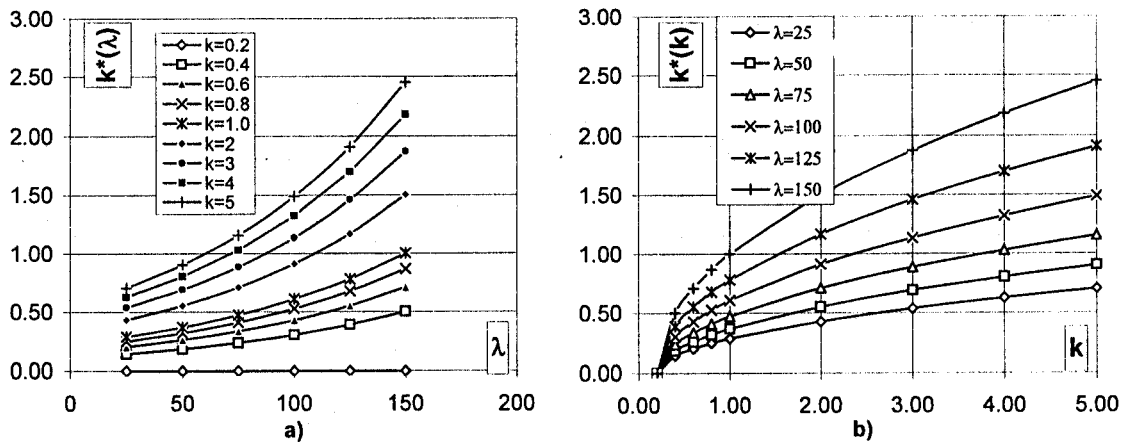
gdje je μ_a procenat podužne armature uz jednu ivicu. Ovo je uticaj relativnog smanjenja krutosti u pravcu kraće strane, što utiče na brži prirast deformacije u tom pravcu. Za karakterističan slučaj pravog savijanja oko "jače" ose ili kada ekscentricitet samo malo skreće u pravcu kraće strane poprečnog presjeka, rezultati eksperimenta podvrgnuti statističkoj obradi imaju nešto veće vrijednosti u odnosu na empirijski izraz (7). Za ovu oblast tj. k>5, preporučuje se uvećanje vrijednosti k*, koja opisuje konačnu ravan deformacije, za oko 10%. Diskontinuitet, koji se javlja u ovoj oblasti, predstavlja posledicu matematičkih aproksimacija kao i nepredvidljivosti stvarne deformacije u pravcu kraće strane poprečnog presjeka. Na slici 15 prikazana je zavisnost konačne vrijednosti koeficijenta k* u funkciji vitkosti □ sa početnim koeficijentom presjeka k, pomoću kojeg se može odrediti dispozicija presječnih sila u graničnom stanju loma u presjeku, odnosno odrediti prirast ugla rotacije χ u pravcu kraće strane poprečnog presjeka. Iz izraza:

$$k^* = \frac{e_y^*}{e_z^*} \cdot \frac{d}{b}; \qquad (9)$$

slijedi novi odnos $e_y^* / e_z^* = n$, tako da se konačni ekscentricitet dobija na osnovu izraza:

$$e_y^* = \frac{n}{\sqrt{1+n}} \cdot e^{II} \text{ i } e_z^* = \frac{1}{\sqrt{1+n}} \cdot e^{II}; \qquad (10)$$

Na taj način se, poznajući ekscentricitet po teoriji II reda, može konačno analizirati poprečni presjek opterećen na koso savijanje bilo kojim od poznatih postupaka.



Slika 15. Zavisnost konačnog koeficijenta k u funkciji a)vitkosti; b) početnog koeficijenta k*

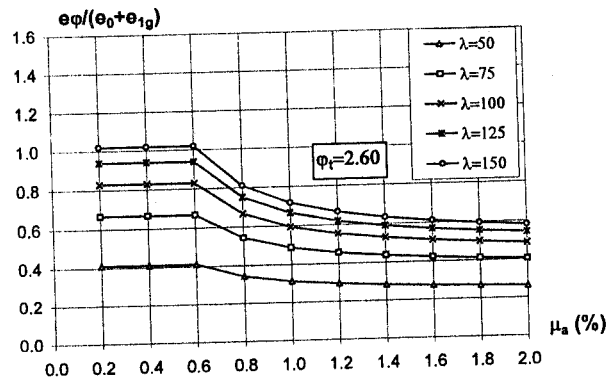
5.2. Proračun ekscentriciteta usled tečenja betona

Nakon obimne statističke analize podataka koji su dobijeni iz sopstvenog eksperimenta i sličnih eksperimenata izvođenih na vitkim stubovima savijanim samo oko jedne ose, došlo se do zaključka da je izraz za dopunski ekscentricitet usled dejstva dugotrajnog opterećenja, koji važi za pravo savijanje, vitkih stubova potrebno modifikovati. U našem pravilniku PBAB 87 proračun e_φ ima čisto teorijski karakter uključujući Eulerovu kritičnu silu i predstavlja rješenje idealizovanih matematičkih proračunskih modela. Stiče se utisak da je ovaj proračun potrebno sprovesti samo sa formalne strane jer je njegov uticaj najčešće zanemarljiv u realnim područjima, jer visoka vrijednost Eulerove kritične sile najčešće amortizuje uticaj tečenja, koji je opisan eksponencijalnom funkcijom. Sa druge strane se pokazuje da je ekscentričnost opterećenja usled tečenja često potcijenjena i da njen udio kod koso savijanih stubova ima još značajniji uticaj [23]. Na osnovu niza sopstvenih eksperimentalnih podataka uključujući i teorijski tretman problema [20], korišćenjem regresione analize, došlo se do odgovarajućeg empirijskog izraza za ekscentricitet e_φ:

$$e_\varphi = \frac{\left(e_{1g} + e_0\right)}{4} \cdot \left(e^{\frac{\mu_a}{\mu_a - 0.2} \frac{\lambda - 25}{2\lambda} \varphi_l} - 1 \right) \qquad (11)$$

U ovom izrazu je sadržan uticaj napona u betonu preko ekscentriciteta e_{1g}, odnosno ekscentriciteta usled imperfekcija e_0, koji figuriše bez obzira na veličinu sile pritiska. Uočeno je da procenat podužne armature ima veliki uticaj na veličinu ostvarenog tečenja, budući da u permanentnoj preraspodjeli armatura prihvata, tokom vremena, sve veći dio napona pritiska. U nizu teorijskih razmatranja oblik eksponencijalne funkcije za vitkost □ dobro odgovara rezultatima dobijenim na osnovu sopstvenih eksperimentalnih istraživanja, kao i rezultatima istraživanja Warner-a i Kordin-e [21]. U statističkoj obradi podataka, ovdje se koeficijent korelacije približio na oko 0.95. Kao ilustracija daju se dijagrami relativnog odnosa ekscentriciteta usled tečenja u odnosu na ukupan ekscentricitet od uticaja stalnog tereta i imperfekcija (slika 16).

U oblasti, koja se u odnosu na procenat armiranja najčešće koristi u praksi (slika 16), uočava se da je diferencijal ekscentriciteta e_φ najveći, dok se u oblasti jako armiranih presjeka ovaj uticaj relativno brzo gubi.



Slika 16. Dijagram zavisnosti $e_{\square}$ od procenta podužne armature za različite vitkosti stuba

Takođe se u izrazu za ekscentricitet e_{φ} računaju i vrijednosti ispod vitkosti λ=50, koji se prema našem pravilniku mogu zanemariti u odnosu na pravo složeno savijanje vitkih stubova. Kako se očekuju veće deformacije usled tečenja betona kod koso savijanih vitkih stubova, predlaže se da kriterijum za zanemarivanje ovog uticaja bude na granici koja razdvaja kratke i vitke stubove tj. λ_n=25.

Nelogičnosti u predloženom izrazu (11), koje bi se mogle javiti u slučaju male vrijednosti normalne sile pritiska, nijesu u polju velike važnosti, budući da je za vitke stubove ukupan efekat usled vitkosti za veliki ekscentricitet zanemarljiv. Istovremeno je uticaj tečenja za takve pretežno savijane elemente potrebno računati prema tačnijim postupcima u skladu sa metodom AEEM koja je sadržana u većini savremenih propisa, koji regulišu tu oblast.

Ispod procenta armiranja od μ_a = 0.6% uočava se da nema velikih promjena u odnosu na ekscentricitet tečenja, pa je za tu oblast (slabo armiranih presjeka ili nearmiranih presjeka) predloženo da se zadrži ista vrijednost kao za procenat armiranja 0.6% (slika 16).

Sve se ovo odnosi na granični pravac deformacija, koji se određuje na ranije opisani način. Istovremeno se daje predlog za proračun e_{φ} pritisnutih stubova oko jedne ose, gdje se, prema analizi niza eksperimentalnih rezultata [21], [15], [18]..., može primijeniti izraz (11), ali korigovan faktorom 0.85. Ova korekcija sa stanovišta fizičke interpretacije problema izgleda logična jer je u oblasti koncentracije napona u uglu proces plastifikacije intenzivniji u odnosu na ravnu ivicu, kakav je slučaj kod pravog savijanja. U prilog ovoj tezi je i činjenica da su maksimalne vrijednosti dilatacija u uglu, dobijene eksperimentom, pri lomu imale vrijednost od oko 4.0 ‰. Treba napomenuti da iz tehnoloških razloga ove dilatacije nijesu mogle biti direktno mjerene na uglu, već su preračunate u odnosu na dilatacije izmjerene na udaljenosti od oko 3 cm u odnosu na ivicu presjeka, uvažavajući Bernulijevu hipotezu o ravnosti presjeka.

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu je prikazana analiza relevantnih rezultata sopstvenih eksperimentalnih istraživanja u oblasti koso savijanih vitkih ab stubova pri dejstvu kratkotrajnih i dugotrajnih opterećenja, na osnovu koje se mogu donijeti određeni zaključci:

- Tačniji proračun vitkih elemenata koji su napregnuti na koso savijanje ne može se sprovoditi odvojeno oko svake ose iz jednostavnog razloga što se u uslovima ravnoteže dio površine poprečnog presjeka uzima dva puta.
- Pad nosivosti poprečnog presjeka usled prirasta vitkosti i u slučaju koso savijanih vitkih ab stubova je evidentan i dobro se slaže sa proračunskim vrijednostima.
- Porast nosivosti poprečnog presjeka stuba pri povećanju procenta podužne armature je značajan i dobro se poklapa sa rezultatima proračuna. Uticaj poprečne armature je evidentan više kod formiranja mehanizma loma nego u doprinosu nosivosti presjeka. Pri tome je od značaja imati uzengije na manjem rastojanju, dok je površina presjeka u ispitivanim slučajevima bila indiferentna. Iako se iz ovog eksperimenta raspolaže malim brojem rezultata, čini se da utezanje vitkih stubova nema efekta u pogledu prirasta nosivosti, ali je sa stanovišta povećanja duktiliteta korisno.
- Tečenje betona ima značajan uticaj na promjenu naponsko-deformacijskog stanja, jer dovodi do prorasta sila u presjeku i do pada nosivosti koji za oblast visokih vitkosti može iznositi i do 40%.
- Analizom sila u presjeku, potvrđuje se teza da za veličinu ostvarenog tečenja betona veoma važnu ulogu ima i procenat podužne armature u armiranobetonskom presjeku stuba.
- U uslovima alternativnog dejstava horizontalnih seizmičkih sila, realno je očekivati promjenu naponskog stanja i brže otvaranje prslina u konsolidovanom pritisnutom betonu koji je doživio deformacije usled tečnja betona pri dejstvu gravitacionih sila. Ovo može biti posebno izraženo u stubovima na uglovima zgrada, koji bi zato, bez obzira na veličinu vitkosti, trebalo da posjeduju mnogo veću duktilnost kritičnih presjeka, što bi sigurno amortizovalo ove kratkotrajne ali veoma neugodne uticaje. Zato bi stubove na uglovima prostornih ramovskih konstrukcija uključujući i mješovite sisteme trebalo armirati jačom poprečnom armaturom po čitavoj visini stuba a ne samo na spoju sa riglama odnosno temeljom.
- Primjenom empirijskog izraza za konačni oblik deformacione linije stuba može se na jednostavan način utvrditi konačan pravac deformacije u graničnom stanju nosivosti. U tom slučaju, primjenom bilo kojeg postupka proračuna koji uzima stvarne ili pojednostavljene dijagrame m-n-k, uz pretpostavljeni oblik deformacione linije, može se dobro procijeniti konačna vrijednost sila u presjeku i izvršiti dimenzionisanje. Metoda dopunske ekscentričnosti, za umjereno vitke stubove, i ovdje može biti primijenjena pod uslovom da se svi dopunski ekscentriciteti računaju za konačan pravac deformacija.

7. LITERATURA

[1] Aćić M., Pakvor A., Perišić Ž.: "Teorija armiranobetonskih i prethodno napregnutih konstrukcija", Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Naučna knjiga, Beograd, 1986.

[2] Aćić M., Zejak R.: "Prilog proračunu vitkih ab stubova pravougaonog preseka sa kosim savijanjem", Društvo građevinskih konstruktera Srbije, Aranđelovac, 1992.
[3] Alender V., Pavić A.: "Numerički test tačnosti postupka Model - stub kao rešenja granične nosivosti vitkih armiranobetonskh stubova", IX Kongres Saveza društava konstruktera Jugoslavije, Cavtat, 1991.
[4] Bažant Z. P., Cedolin L., Mayen R.T., "New Method of Analysis of Slender Columns", ACI Structural Journal, April, 1991., 391-402 p.
[5] Beyuhov N. I., Lužin O. V., Kolkunov N. V.: "Ustoičivost i dinamika sooruženii", Moskva, 1987.,
[6] Činenkov J. V.: "Rasčet na kosoi izgib elementov pramougolnogo sečenia po trešćinostoikosti i deformaciam", Beton i Željezobeton, April, Moskva, 1991.
[7] Dilger W. H.: "Methods of Structural Creep Analysis, Creep and Shrinkage in Concrete Structures", Chapter 9, Chichester, John Wiley&Sons, New York, 1982., 305-339 pp.
[8] DIN 1045: "Beton und stahlbeton bemessung und ausfuehrung", Deutsches Institut fur Normung, 1988.
[9] EVROKOD 2: "Proračun betonskih konstrukcija" (prevod sa engleskog), Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd 1994., 348 str.
[10] Gryeschowitz R., Kordina K., Teutsch M.: "Experimental Investigations of the Load-Deformation Behaviour of Slender RC Columns Biaxil Eccentricity", Deutscher Ausschuss fur Stahlbeton. Heft 423. GmbH1992, Berlin, 1992., 5-76 pp.
[11] Grasser E., Galgoul N. S.: "Praktisches Verfahren zur Bemessung Schlanker Stahlbetonstutzen unter Berucksichtigung Zweiachsiger Biegung", Beton und Stahlbetonbau, Vol. 81, No. 7, July 1986. 173-177p.
[12] Hsu C. T.: "Analysis and Design of Square and Rectangular Columns by Equation of Failure Surface", ACI Structural Journal, February, 1988, 167-179 p.
[13] Haro C. E., Quast U.: "Neuartige Hilfsmittel zur Stutzen-bemesung nach Eurocode 2", Ernest&-Sohn, Beton und Stahlbetonbau 89, 1994., 209-216 pp.
[14] Hong H. P.: "Strenght of Slender Reinforced Concrete Columns under Biaxial Bending, Journal of Structural Engineering", July, 2001., 758-762 p.
[15] Ivković M., Aćić M., Perišić Ž. Pakvor A.: "Reološke osobine očvrslog betona", Seminar: Beton-svojstva i tehnologija, Aranđelovac 1984., 21 str.
[16] Ivković M., Praščević Ž.: "Problemi stabilnosti armiranobetonskih konstrukcija", Simpozijum Saveza društava građevinskih konstruktera Jugoslavije, Trogir, 1980.
[17] Kordina K., Quast U.: "Bemessung von Schlanken Bauteilen-Knicksicherheitnachewis", Beton-Kalender 1, Ernest und Sohn, 1989.
[18] Maier A.: "Berechnung der Momente dez Dauerbelasteten", Schlanken Stahlbeton-druckglieds nach der Theorie II. Ordnung, Beton- und Stahlbetonbau 34 (1986), 10, Berlin, 1986.
[19] Perišić Ž.: "Analiza uticaja tečenja i skupljanja u betonskim konstrukcijama sa prslinama primenom idealizovanog preseka sa korigovanim efektivnim modulom betona", Naše Građevinarstvo br.38, Beograd, 1984., 1165-1170 str.
[20] Ržanicin A. R.: "Teorija puženja materijala", Građevinska knjiga, Beograd, 1974., 358 str.
[21] Warner R., Kordina K.: "Ultimate Strength Design Charts for Columns with Biaxial Bending", ACI Journal, V 63, No. 11, November 1966.
[22] Sekulović M.: "Metod konačnih elemenata", Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Građevinska knjiga, Beograd, 1984., 592 str.
[23] Zejak R.: "Prilog analizi vitkih armiranobetonskih elemenata sa kosim savijanjem", Doktorska disertacija, Beograd, 2002.g., str. 183.
[24] Zejak R.: "Osnovne postavke za eksperimentalnu analizu koso savijanih vitkih ab stubova", 10 Kongres JDGK, Vrnjačka Banja, 8-10 jun 1998.g. R-11, str. 61-66.
[25] Zejak R.: "Experimental Analysis of Slender RC Columns with Rectangular Section, 8th International Symposium, Ohrid, Republic of Macedonia, 30. september - 2 october 1999.g. V 1, str. BK15/1-6.
[26] PBAB 87: "Pravilnik o tehničkim normativima za beton i armirani beton", Službeni list SFRJ broj 11. od 23.02.1987. godine.

REZIME

EKSPERIMENTALNA ANALIZA VITKIH ARMIRANOBETONSKIH ELEMENATA NAPREGNUTIH NA KOSO SAVIJANJE

Radomir ZEJAK

U ovom radu je istraživan problem vezan za armiranobetonske vitke elemente koji su napregnuti na koso savijanje u odnosu na dvije glavne centralne ose inercije pravougaonog poprečnog presjeka. Osnovni problem u ovoj analizi jeste u nepoklapanju pravca deformacije sa pravcem savijanja. Na taj način se uvođenjem efekata teorije II reda, proračun ovih elementa dodatno komplikuje, jer se pored geometrijske i materijalne nelinearnosti javlja i nelinearna rotacija neutralne ose u presjeku.

U radu su prikazani rezultati sopstvenog eksperimentalnog istraživanja na armirano–betonskim vitkim stubovima. Na osnovu rezultata dobijenih mjerenjem opisano je ponašanje koso savijanih stubova. Takođe su registrovani karakteristični tipovi loma, veličina graničnog opterećenja, kao i uticaji tečenja pri eksploataconom opterećenju. Istovremeno su opisani i fenomeni u procesu eksperimentalnih ispitivanja, koji su po mišljenju autora, zasluživali pažnju i koji su se odnosili na izučavanu oblast u ovom radu. Istovremeno su prikazani i empirijski izrazi dobijeni za određivanje graničnog ugla rotacije u funkciji vitkosti i početnog ekscentriciteta opterećenja, sa uzimanjem u obzir i efekata tečenja.

Ključne riječi: stub, vitkost, koso savijanje, ugao rotacije, pravac deformacije, tečenje betona, eksperiment.

SUMMARY

EKSPERIMENTAL ANALYSIS OF SLENDER REINFORCED CONCRETE ELEMENTS UNDER BIAXIAL BENDING

Radomir ZEJAK

This paper investigated the problem regarding reinforced concrete slender elements that are eccentrically stressed in regards to two main central inertia axis with a rectangular cross section. The main problem in this analysis is in the nonalignment of deformation directions with the directions of applied bending. In such way, by introduction of the theory 2nd order, the design of these elements is additionaly complicated, beacuse besides geometrical and material nonlinearity also arises the nonlinear rotation of neutral axis in the cross section.

In this paper presented results own experimental research on reinforced concrete slender columns. On the bases of measured results the behavior of biaxial bending columns were described. The characteristic types of breaking were also recorded, the size of ultimate load as well as the influence of the flow at the particular level of load. At the same time the phenomenon in the process of experimental research were described which are, according to authors opinion, earned the attention and which are related to the studied fielde in this paper. There are presented empirian relationship for estimate limit rotation angle, too. It depends of slendernes ratio and begining eccentricity loads, taking effects creep of concrete into considerations.

Key words:column, slendernes ratio, biaxial bending, rotation angle, deformation direction, creep of concrete, test.