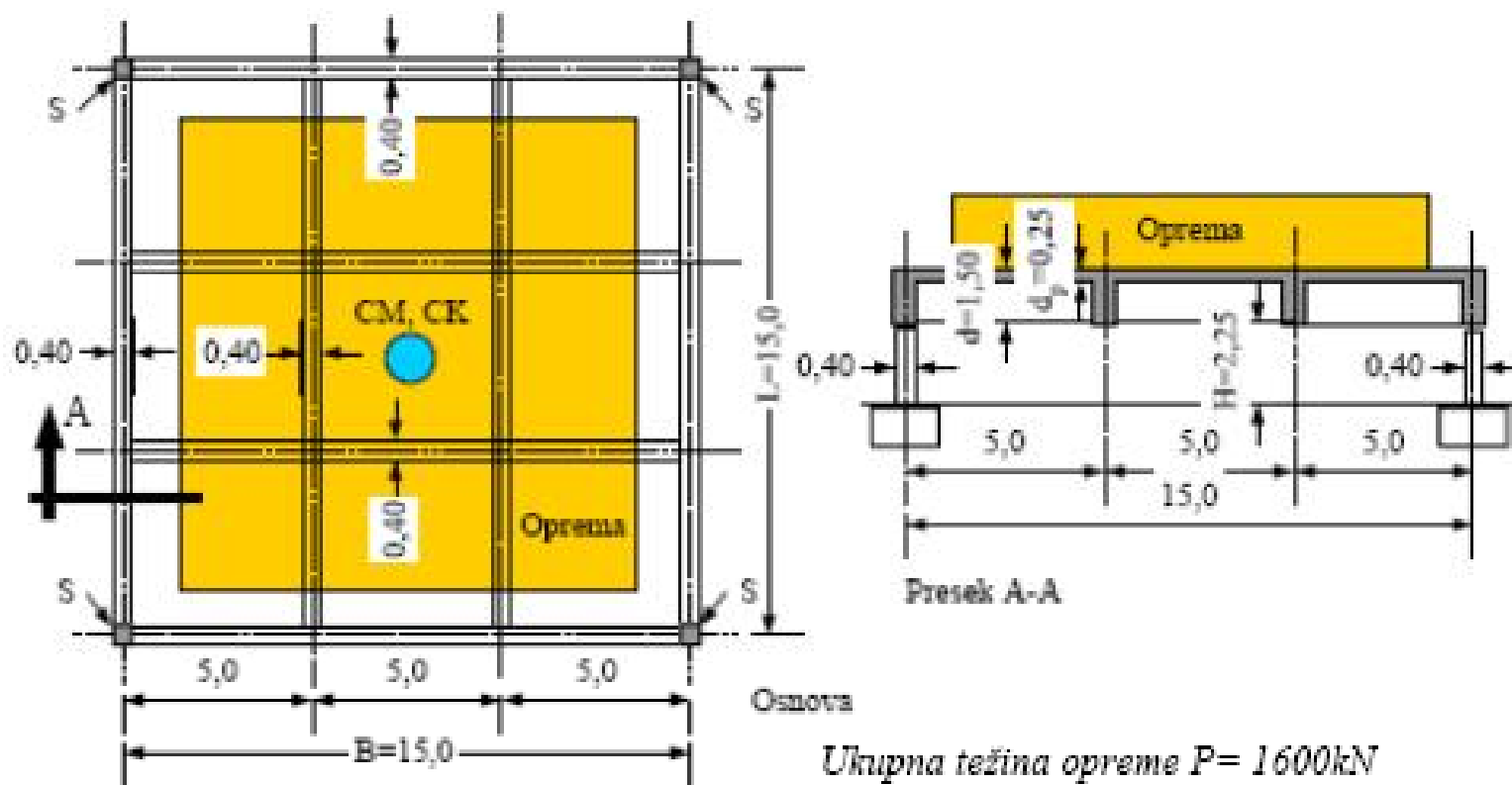


Okvirna konstrukcija platforme – temelja mašinske opreme



Ukupna težina opreme $P=1600\text{kN}$

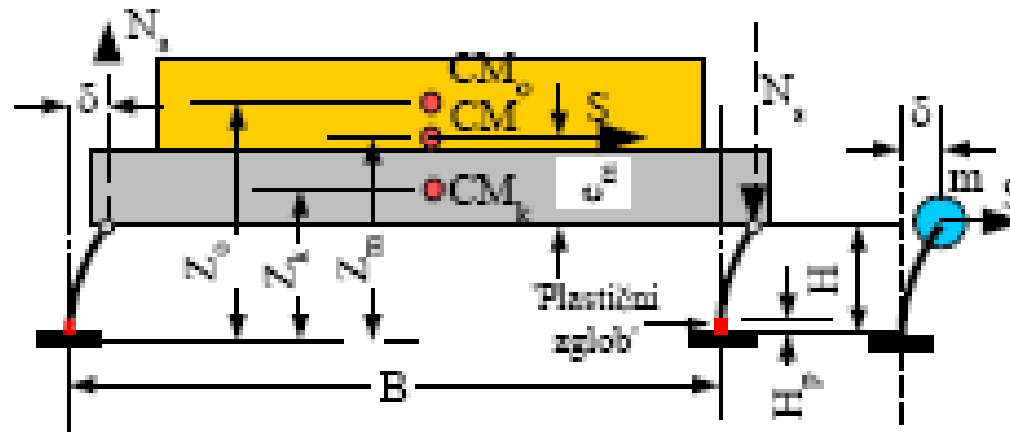
Objekat II kategorije

Tlo II kategorije

Područje VII stepena intenziteta zemljotresa

Uticaje vetra zanemariti (zatvoren objekat)

Dinamički model konstrukcije



- Ekvivalentna statička analiza
- N_s se zanemaruje
- Nosivost plastičnog zgloba visine H_p
- Dinamički model: konzola sa masom na vrhu

Analiza opterećenja i masa

Sopstvena težina konstrukcije (zanemareni stubovi):

Ploča ($d_p = 25\text{cm}$)	$0,25 \times 15,40^2 \times 25$	$= 1482,3 \text{ kN}$
Grede ($b/d = 40/150\text{cm}$)	$8 \times 0,40(1,50 - 0,25)15 \times 25$	$= 1500,0 \text{ kN}$
	<i>„odbyena ploča“ ↑</i>	$G = 2982,3 \text{ kN}$
		$P = 1600,0 \text{ kN}$

Oprema

Komentar: S obzirom da je oprema fiksirana, usvaja se da je u slučaju zemljotresa na konstrukciji prisutno ukupno korisno opterećenje P .

Ukupna težina:

$$W = G + P = 2982,3 + 1600,0 = 4582,3 \text{ kN}$$

Ukupna masa konstrukcije i opreme:

$$m = W/g = 4582,3/9,81 = 467,1 \text{ kNs}^2/\text{m}$$

Aksijalno opterećenje stubova

Stalno opterećenje:

$$N_g = G/4 = 2982,3/4 = 745,6 \text{ kN}$$

Korisno opterećenje:

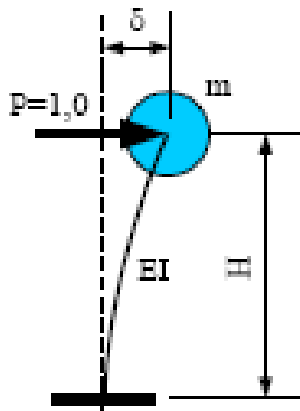
$$N_p = P/4 = 1600,0/4 = 400,0 \text{ kN}$$

Totalno opterećenje:

$$N_w = W/4 = 4582,3/4 = 1145,6 \text{ kN}$$

Analiza opterećenja i masa

Period oscilovanja



Period oscilovanja T , slika 1.3:

$$T = 2\pi\sqrt{m\delta}$$

$$m = 467,1 \text{ kNs}^2/\text{m} \text{ (ukupna masa)}$$

$$\delta = 1 \times H^3 / (3EI)$$

pomeranje mase usled jedinične horizontalne sile $P=1$

$$\text{MB30} \rightarrow E = 3,15 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Četri stuba: } b/d = 40/40 \rightarrow I = 4 \times 0,40^4 / 12 = 8,53 \times 10^{-3} \text{ m}^4$$

$$EI = 3,15 \times 10^7 \times 8,53 \times 10^{-3} = 2,688 \times 10^5 \text{ kNm}^2$$

$$H = 2,25 \text{ m}$$

$$\delta = 1 \times 2,25^3 / (3 \times 2,688 \times 10^5) = 1,412 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$T = 2\pi\sqrt{467,1 \times 1,412 \times 10^{-5}} = 0,51 \text{ s} \quad (< 2,0 \text{ s član 27})$$

Proračun prema Pravilniku YU81

(Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju objekata visokogradnje u seizmičkim područjima – Službeni list SFRJ 1981)

$W = 4582,3 \text{ kN}$	- ukupna težina objekta
$K = k_0 k_s k_p k_d$	- „ukupni seizmički koeficijent“
$k_0 = 1,0$	- „koeficijent kategorije objekta“ (II kategorija)
$k_s = 0,025$	- „koeficijent seizmičkog intenziteta“ (VII zona)
$k_p = 1,0$	- „koeficijent duktiliteta“ (savremena AB konstrukcija)
$k_d = 0,7/T$	- „koeficijent dinamičnosti“ (II kategorija tla)

Koeficijent dinamičnosti

$$K_d = 0,7/0,51 > 1,0 \rightarrow \text{usvojeno } K_d = 1,0$$

Ukupni seizmički koeficijent K :

$$K = 1,0 \times 0,025 \times 1,0 \times 1,0 = 0,025 > \min K = 0,02 \text{ (član 23)}$$

Ukupna projektna seizmička sila S :

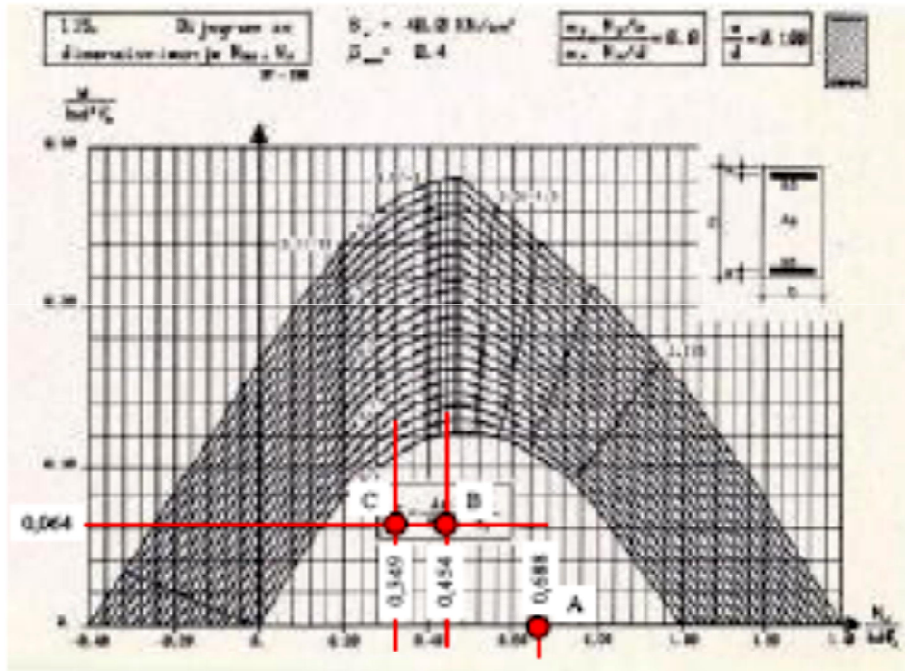
$$S = 0,025 \times 4582,3 = 114,6 \text{ kN}$$

Računsko „pomeranje“ pri zemljotresu iznosi:

$$d = S\delta = 114,6 \times 1,412 \times 10^{-5} = 1,6 \times 10^{-3} \text{ m} < H/600 = 2,25/600 = 3,75 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Proračun prema Pravilniku YU81

(Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju objekata visokogradnje u seizmičkim područjima – Službeni list SFRJ 1981)



Dijagram 1.1 - Dijagram interakcije simetrično armiranog pravougaonog preseka, $a/d=0,1$, $\sigma_s=400\text{MPa}$

$$S=KxW$$

A: Gravitaciono opterećenje

$$N_u=1,9N_g+2,1N_p=$$

$$1,9 \times 745,6 + 2,1 \times 400,0 = 2256,6 \text{ kN}$$

$$M_u \approx 0$$

$$n = N_u / (bd\beta_B) =$$

$$2256,6 / (40 \times 40 \times 2,05) = 0,688$$

$$m = 0$$

Dijagram interakcije br.115 /3/, tačka „A“ na Dijagramu 1.1, $\rightarrow \bar{\mu}=0$.

B: Kombinacija sa seizmikom, nepovoljno G

$$M_s = SH/4 = 114,6 \times 2,25/4 = 64,5 \text{ kNm}$$

$$N_u = 1,3N_w = 1,3 \times 1145,6 = 1489,3 \text{ kNm}$$

$$M_u = 1,3M_s = 1,3 \times 64,5 = 83,8 \text{ kNm}$$

$$n = N_u / bd\beta_B = 1489,3 / 40^2 \times 2,05 = 0,454$$

$$m = M_u / bd^2\beta_B = 83,8 \times 10^2 / 40^3 \times 2,05 = 0,064$$

Tačka B

C: Kombinacija sa seizmikom, povoljno G

$$N_u = 1,0N_w = 1,0 \times 1145,6 = 1145,63 \text{ kNm}$$

$$M_u = 1,3M_s = 83,8 \text{ kNm}$$

$$n = 1145,6 / 40^2 \times 2,05 = 0,349$$

$$m = 0,064$$

Tačka C

Minimalna armatura

Usv. 4Ø19 ($\mu=0,7\%$)

Proračun na smicanje

Transverzalna sila jednog stuba

$$Q_s = S/4 = 114,6/4 = 28,6 \text{ kN}$$

Granična vrednost transverzalne sile ($\gamma=1,3$)

$$Q_u = \gamma Q_s = 1,3 \times 28,6 = 37,2 \text{ kN}$$

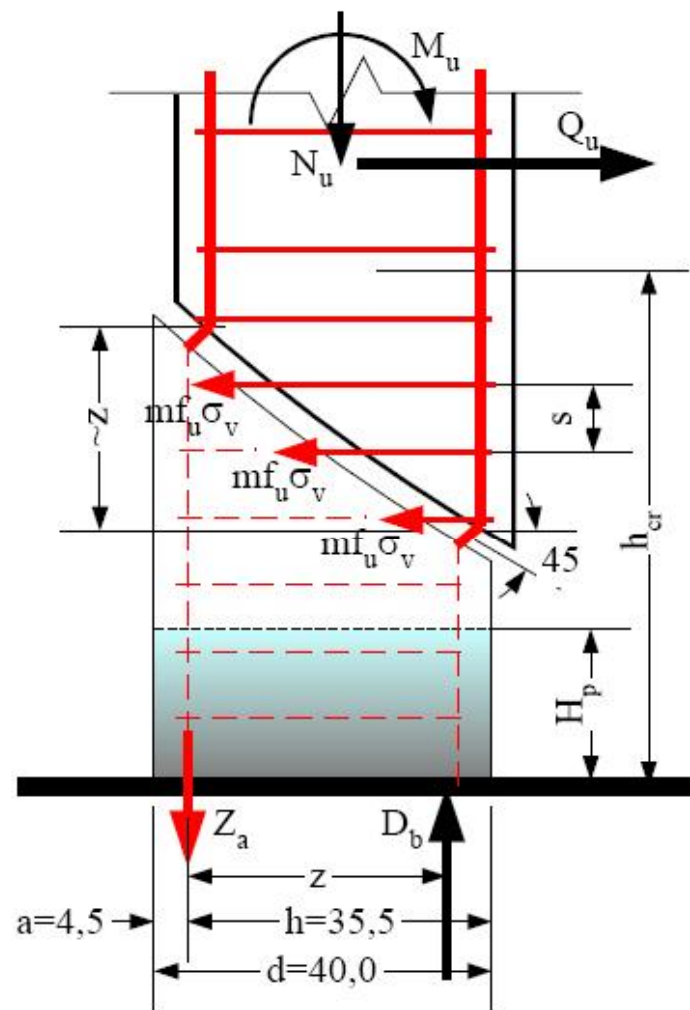
Najveća dozvoljena vrednost transverzalne sile prema BAB-u, član 92 /2/, ograničena je dozvoljenom vrednošću „nominalnog napona smicanja“ τ_n preseka, koji treba da je manji od vrednosti $5\tau_r$.

$$MB30 \rightarrow \tau_r = 1,1 \text{ MPa} \quad (\text{BAB, član 89 /2/})$$

$$\tau_n = Q_u / (bz) = 37,2 / (40 \times 32,0) = 0,03 \text{ kN/cm}^2 = 0,3 \text{ MPa} < 5\tau_r = 5,5 \text{ MPa}$$

Proračunske uzengije stuba Četiri, do sada poznata razloga zbog čega su uzengije stubova korisne, su:

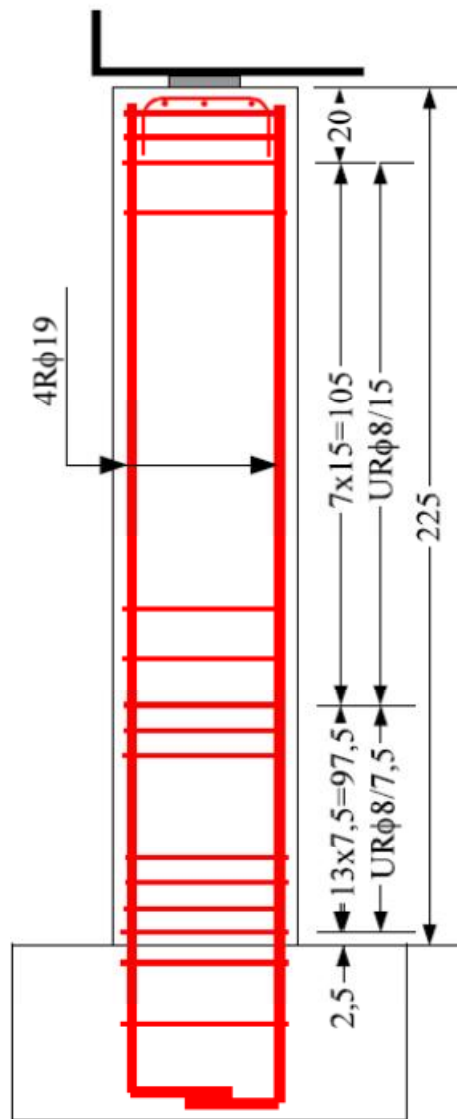
- osiguranje od loma usled transverzalnih sila;
- utezanje preseka betona i povećanje duktilnosti;
- „podupiranje“ vertikalne armature i sprečavanje njenog izvijanja;
- „poprečno armiranje“ nastavaka vertikalne armature.



Slika 1.4 - Osiguranje od loma transverzalnim silama



Slika 1.4.a - Ilustracija loma stuba usled zemljotresa



$$\Sigma X = 0 \rightarrow (mf_u \sigma_v)z/s = Q_u$$

gde su:

$$z \approx 0,9h = 0,9 \times 35,5 = 32,0 \text{ cm}$$

$$m = 2$$

$$f_u = 0,5 \text{ cm}^2$$

$$\sigma_v = 400 \text{ MPa}$$

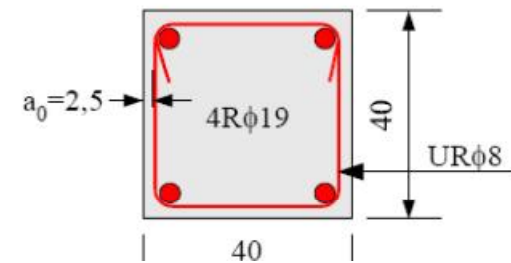
$$Q_u = 37,2 \text{ kN}$$

Maksimalni razmak uzengija $R\emptyset 8$ ($m=2$):

$$s \leq zmf_u \sigma_v / Q_u = 32,0 \times 2 \times 0,5 \times 40,0 / 37,2 = 34,4 \text{ cm}$$

Prema članu 62, maksimalni razmak uzengija iznosi 15 cm, dok se „u blizini čvorova, na dužini 1,0 m, razmak dvostruko smanjuje“.

Usvojeno: $UR\emptyset 8/15$ (7,5)



(1.5)

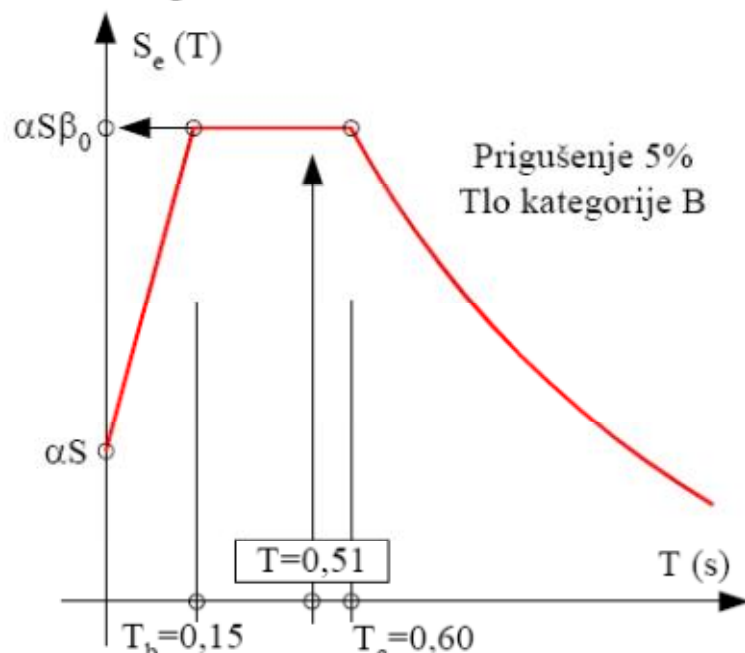
- krak unutrašnjih sila
- „sečnost uzengija“
- površina preseka uzengije ($R\emptyset 8$)
- granica razvlačenja čelika (RA)
- granična vrednost transverzalne sile

Po proračunu nije potrebna armatura – može li stub da bude nearmiran?
 Verovatno ne, jer bi uticaji od seizmike bili znatno veći. Veličina opterećenja nije determinisana već zavisi od pomeranja konstrukcije – njenog odgovora. Armiranje stuba je uslov za stvaranje duktilnog mehanizma

Primer: Proračun prema EC8

(Evrokod 8, Projektovanje seizmički otpornih konstrukcija),
 Elastični odgovor

Prema EC8 /4/, uslovima ovoga zadatka odgovara tlo kategorije B ($S=1,0$), objekat III kategorije (faktor značaja $\gamma_I=1,0$), dok za maksimalno ubrzanje tla u zoni VII stepena intenziteta od $a_g=0,10g$, vrednost odnosa α iznosi $\alpha=a_g/g=0,10$.



$$S_e(T) = \alpha S \beta_0 = 0,10 \times 1,0 \times 2,5 = 0,25$$

$$F_e = S_e W = 0,25 \times 4582,3 = 1145,5 \text{ kN} = 10 \times S (\text{Yu81})!$$

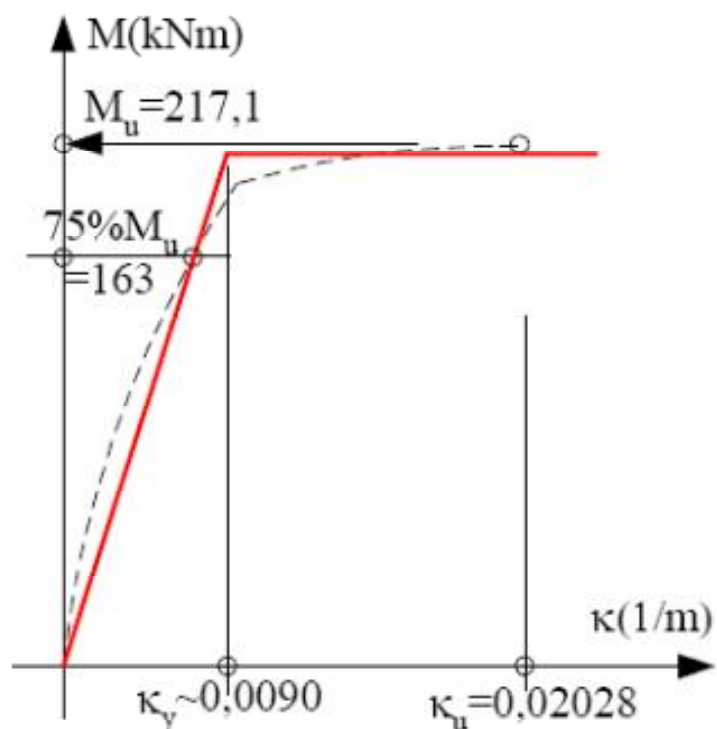
„Realno“ maksimalno pomeranje elastične konstrukcije iznosi:

$$d_e = F_e \delta = 1145,5 \times 1,412 \times 10^{-5} = 0,016 \text{ m}$$

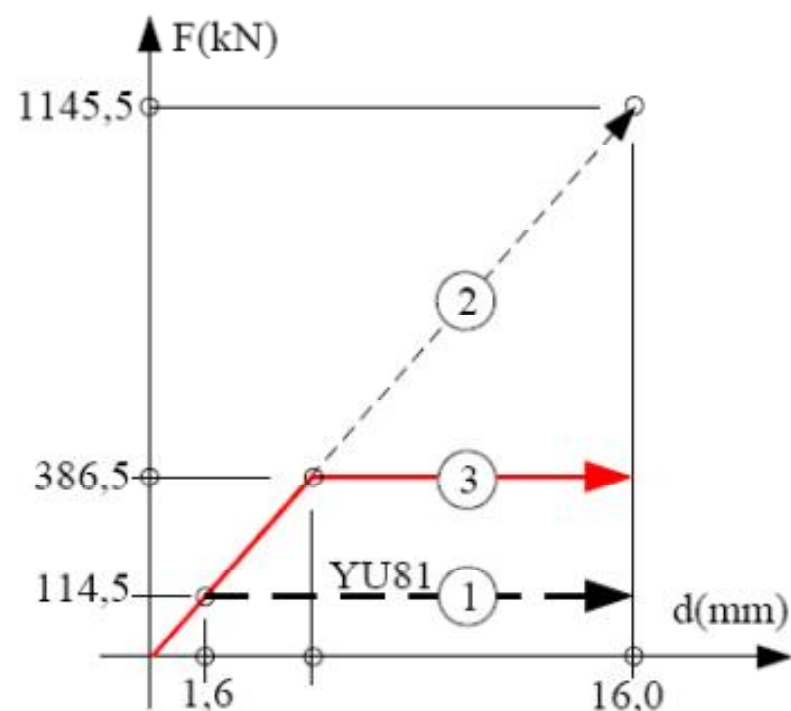
$$Q_{se} = F_e / 4 = 1145,5 / 4 = 286,4 \text{ kN}$$

$$M_{se} = Q_{se} H = 286,4 \times 2,25 = 644,3 \text{ kNm}$$

Pri normalnoj sili u preseku $N_w = 1145,6 \text{ kN}$ (poglavlje 1.2), ekscentricitet iznosi
 $e = M_{se} / N_w = 644,3 / 1145,6 = 0,56 \text{ m} > d/2 = 0,40/2 = 0,20 \text{ m}$ (sila je van preseka)



Slika 1.8 - Moment-krivina preseka



Slika 1.9 - Odgovor konstrukcije, sila-pomeranje

Moment nosivosti preseka iznosi $M_u = 217,1 \text{ kNm}$.

$$F_{CD} = 4M_u/H = 4 \times 217,1 / 2,25 = 386,5 \text{ kN}$$

(= $0,084W = 3,37S$, poglavlje 1.4.2)

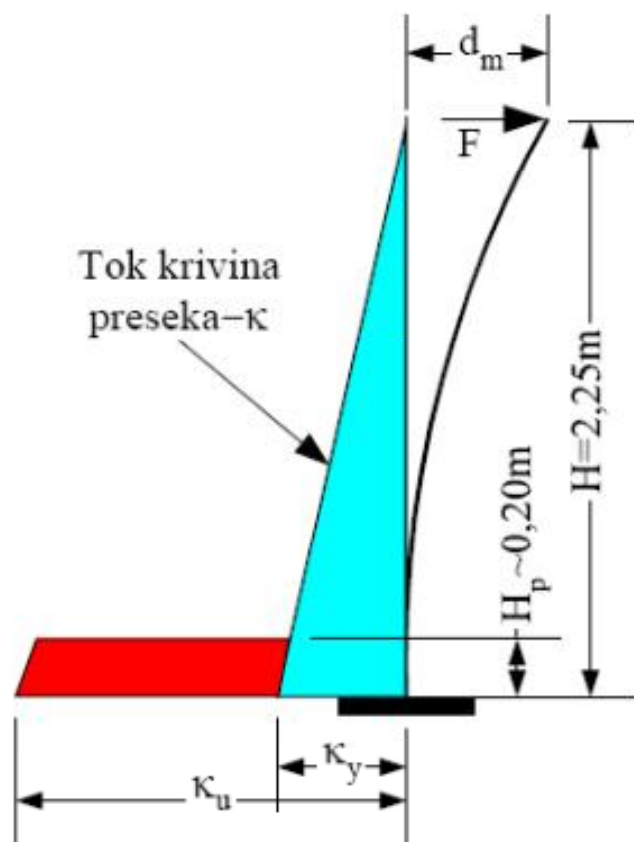
Odgovarajuća transverzalna sila jednog stuba iznosi

$$Q_u = 386,5 / 4 = 96,6 \text{ kN}$$

što je još uvek manje od nosivosti uzengija $UR\emptyset 8/7,5$

$$Q_m = zmf_u\sigma_v/s = 32,0 \times 2 \times 0,5 \times 40 / 7,5 = 136,5 \text{ kN}$$

Može li konstrukcija da izdrži pomeranje $d_e = 16\text{mm}$, ako su dilatacije betona odnosno čelika ograničene na $\varepsilon_b = 3,5\text{‰}$ odnosno $\varepsilon_a = 30\text{‰}$ (usvojeno, jer se u slučaju zemljotresa dozvoljavaju povećane dilatacije čelika)?



Slika 1.10 - Deformacija konstrukcije

Proračun pomeranja preko fiktivnog nosača (uklještenje na vrhu). Pomeranje jednako momentu u fiktivnom uklještenju od poprečnog opterećenja dijagrama datog dijagramom krivine realnog štapa

Prema slici 1.8, maksimalna krivina preseka iznosi $\kappa_u = 0,02028\text{ 1/m}$, a krivina „na granici elastičnosti“ (uz bilinearnu aproksimaciju) $\kappa_y = 0,009\text{ 1/m}$. Sa dužinom plastičnog zgloba $H_p \approx 0,5d = 0,5 \times 0,40 = 0,2\text{ m}$, slika 1.10, pomeranje vrha pri dostizanju kapaciteta deformacija iznosi

$$d_m = (0,5 \kappa_y H) \times 2H/3 + H_p(\kappa_u - \kappa_y) (H - 0,5H_p) =$$

$$(0,5 \times 0,009 \times 2,25) \times 2 \times 2,25/3 +$$

$$0,20(0,02028 - 0,009)(2,25 - 0,5 \times 0,20)$$

$$= 0,0076 + 0,0048 = 0,012\text{ m} = 12\text{ mm} < d_e = 16\text{ mm}$$

Kapacitet deformacija je nedovoljan. Treba povećati ili nosivost (κ_y) ili duktilnost krivine (κ_u/κ_y) - na projektantu je da utvrdi „optimalni balans nosivosti i duktilnosti“.

EC8: Propisane vrednosti faktora ponašanja q_0

TIP KONSTRUKCIJE	DCM	DCH
Ramovi, dvojni sistemi, upareni zidovi	$3.0\alpha_u/\alpha_1$	$4.5\alpha_u/\alpha_1$
Sistemi sa neuparenim zidovima	3.0	$4.0\alpha_u/\alpha_1$
Torziono fleksibilni sistemi	2.0	3.0
Sistemi obrnutog klatna	1.5	2.0

Za ramovske konstrukcije:

- jednospratne: $\alpha_u/\alpha_1 = 1.1$
- višespratne, sa jedim brodom: $\alpha_u/\alpha_1 = 1.2$
- višespratne, sa više brodova i dvojni sistemi ekvivalentni ramovima: $\alpha_u/\alpha_1 = 1.3$

Za konstrukcije sa zidovima:

- sistemi sa samo dva neuparena zida po pravcu: $\alpha_u/\alpha_1 = 1.0$
- ostali sistemi sa neuparenim zidovima: $\alpha_u/\alpha_1 = 1.1$
- sistemi sa uparenim zidovima: $\alpha_u/\alpha_1 = 1.2$

Prema YU81 dobijen je minimalni procenat armiranja. Da li je moguće obezbediti "elastičan" odgovor konstrukcije bez dodatnih mera utezanja?

Prema EC8, minimalna vrednost realno *obezbeđenog faktora ponašanja* iznosi $minq=1,5$, odnosno, nivo seizmičkog opterećenja nema potrebe usvajati većim od

$$max F_d \leq max S_d W = S_e W / minq = S_e W / 1,5 = 0,67 S_e W$$

U konkretnom slučaju

$$F_d = 0,67 \times 0,25 \times 4582,3 = 767,5 \text{ kN}$$

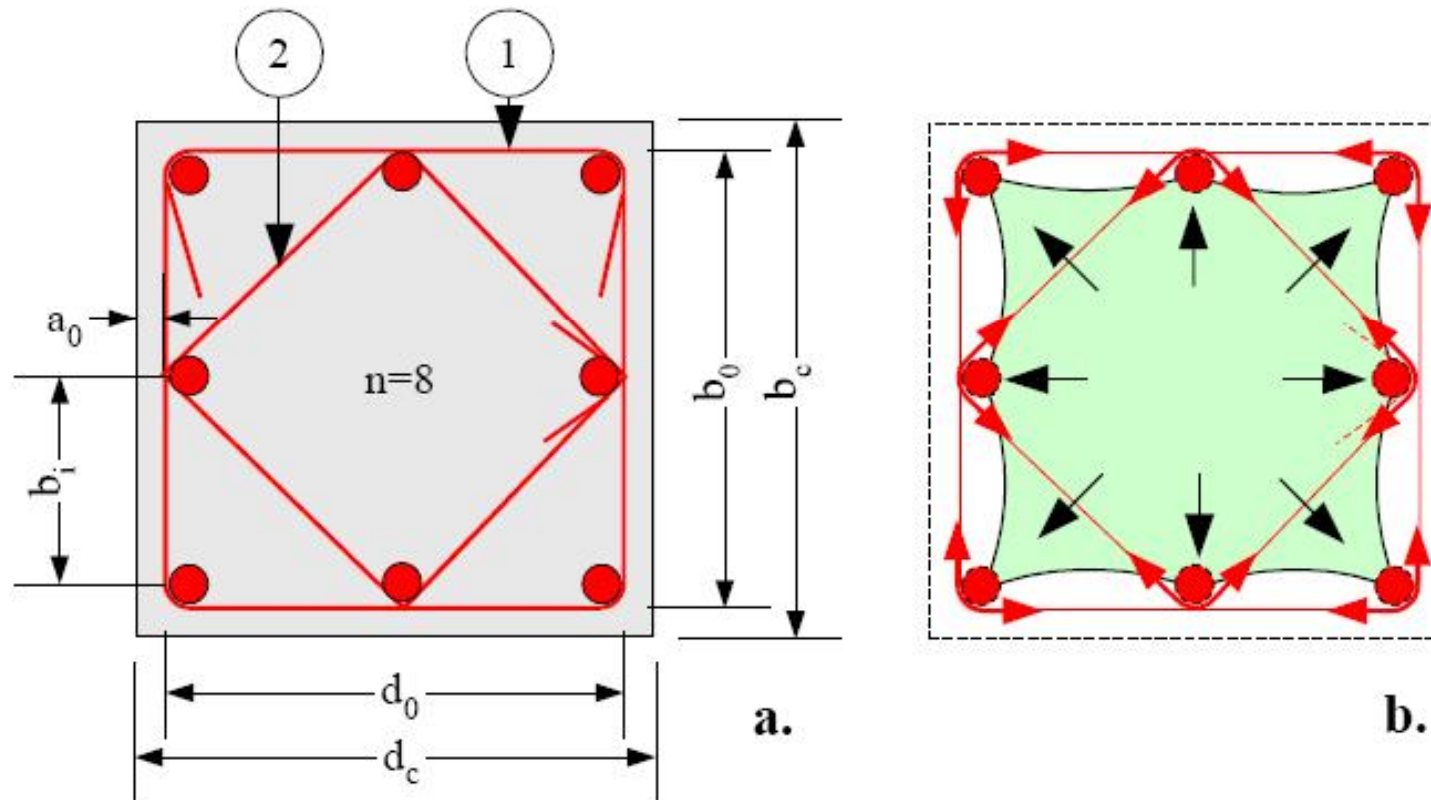
Normalna sila i momenat jednog stuba tada iznose:

$$N_w = 1145,6 \text{ kN}$$

$$M_s = 767,5 \times 2,25 / 4 = 431,7 \text{ kN}$$

Sa vrednostima koeficijenata sigurnosti $\gamma = 1,0$ za normalnu silu, i $\gamma = 1,3$ za moment savijanja, potrebna ukupna armatura preseka 40/40 cm, armiranog ravnomerno po obimu iznosi $pot F_a = 100 \text{ cm}^2$, $\mu = 6,25\%$. Prema BAB- u, član 189, maksimalni dozvoljeni procenat armiranja je 6%, dok savremeni seizmički propisi procenat armature pritisnutih elemenata ograničavaju na oko 4,0%. Prema tome, potrebna nosivost za elastični odgovor konstrukcije ne može da se obezbedi sa usvojenom armaturom, pa ni sa eventualno maksimalno dozvoljenom armaturom u preseku.

Da li su usvojene uzengije UR \emptyset 8/7,5 dovoljne da obezbede potrebnu duktilnost i za povećan kapacitet pomeranja ($0.12 < 0.16\text{mm}$)?



Slika 1.11 - Mehanizam utezanja betona

Proračun duktilnosti prema EC8

U slučaju da je normalizovana proračunska aksijalna sila $n_d > 0.2$, beton treba utegnuti poprečnom armaturom tako da bude zadovoljle uslov:

$$\alpha \omega_{wd} \geq 30 \mu_{\phi} v_d \varepsilon_{sy,d} (b_c / b_0) - 0.035 \quad (A)$$

gde je

$$\omega_{wd} = \frac{V_h f_{yd}}{V_0 f_{cd}}$$

mehanički zapreminski koeficijent armiranja uzengijama

V_h

zapremina sloja uzengija na razmaku s (*razmak uzengija*)

V_0

zapremina utegnutog jezgra betona visine s

$$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s$$

projektna granica tečenja čelika

$$f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c$$

projektna čvrstoća betona

$\mu_\varphi = \varphi_u / \varphi_y$ koeficijent duktilnosti krivine, pri čemu je φ_u krivina pri lomu, a φ_y je krivina u trenutku dostizanja prvog tečenja podužne armature

Propisane vrednosti koeficijenta duktilnosti krivine u funkciji osnovnog faktora ponašanja q_o

$$\mu_\varphi = k [2q_o - 1] \quad \text{za } T_1 \geq T_C$$

$$\mu_\varphi = k [1 + 2(q_o - 1)T_C / T_1] \quad \text{za } T_1 < T_C$$

gde su:

$k =$ 1.5 (armatura klase B, srednja duktilnost čelika)
1.0 (armatura klase C, visoka duktilnost čelika)
 T_C gornja granica intervala konstantnog ubrzanja spektralne krive
 T_1 period oscilovanja konstrukcije u prvom tonu.

$v_d = N_d / N_u$ normalizovana proračunska aksijalna sila (max 0.65 (DCM), 0.55 (DCH))

$\varepsilon_{sy,d}$ proračunska granica razvlačenja armature

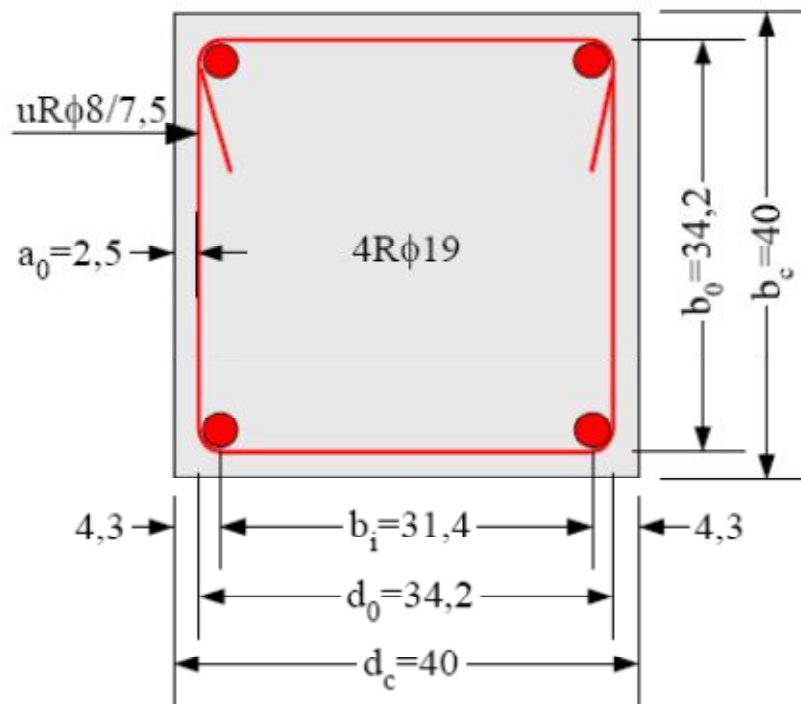
$\alpha = \alpha_n \alpha_s$ faktor efikasnosti utezanja uzengijama, gde je:

$$\alpha_n = 1 - \frac{\sum b_i^2}{6b_0 d_0}$$

$$\alpha_s = \left(1 - \frac{s}{2b_0}\right) \left(1 - \frac{s}{2d_0}\right)$$

n – ukupan broj pridržanih šipki podužne armature

Proračun za naš primer



Slika 1.12 - Varijanta utezanja uzengijama

$$b_0 = d_0 = 40 - 2(2.5 + 0.8/2) = 34.2 \text{ cm}$$

$$b_i = 40 - 2(2.5 + 0.8 + 1.9/2) = 31.4 \text{ cm}$$

MB30 približno odgovara C25/30.

Domaći propisi podrazumevaju visoku duktilnost, dakle radimo za DCH

Obezbeđeno ω_{wd} :

$$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s = 400 / 1.15 = 342.8 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} = f_{ck} / g_c = 25 / 1.5 = 16.67 \text{ MPa}$$

$$V_h = 4 \times 34.2 \times 0.5 = 64.8 \text{ cm}^3 \text{ (R}\phi 8, f_u = 0.5 \text{ cm}^2)$$

$$V_0 = 34.22 \times 7.5 = 8772.3 \text{ cm}^3$$

$$\omega_{wd} = (64.8 \times 342.8) / (8772.3 \times 16.67) = 0.16$$

Da li je zadovoljen uslov (A)?

$$b_c = 40 \text{ cm}$$

$$b_0 = h_0 = 34.2 \text{ cm}$$

$$b_i = 31.4 \text{ cm}$$

$$\alpha_n = 1 - 4 \times 31.4 / (6 \times 34.2^2) = 0.438$$

$$\alpha_s = (1 - 7.5/2/34.2)(1 - 7.5/2/34.2) = 0.793$$

$$\alpha = 0.438 \times 0.793 = 0.347$$

$$N_{sd} = 1145.5 \text{ kN (g=1.0)}$$

$$v_d = 1145.5/1600/1.67 = 0.43 < 0.55 \text{ (DCH) (Zadovoljeno)}$$

$$\varepsilon_{sy,d} = 0.002/1.15 = 0.0017$$

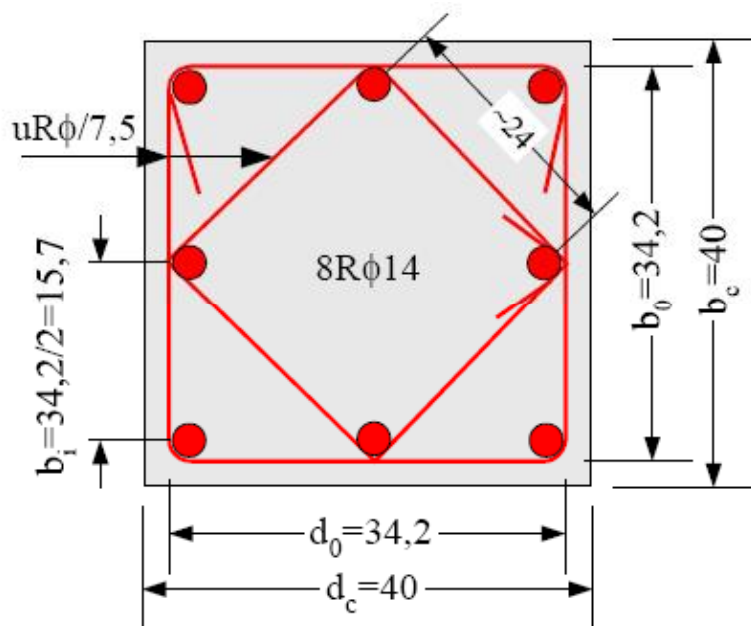
$$q_0 = 4.5 \times 1.1 = 4.95$$

$$\mu_\phi = 1.5 \times (2 \times 4.95 - 1) = 13$$

$$(A) \rightarrow 0.347 \omega_{wd} \geq 30 \times 13 \times 0.43 \times 0.0017 \times 40 / 34.2 - 0.035 = 0.294$$

$$\omega_{wd} \geq 0.294 / 0.347 = 0.847 > 0.16 \rightarrow \textit{nije zadovoljen uslov!}$$

Jedna uzengija nije dovoljna. Da bi se povećao broj uzengija, treba promeniti koncept armiranja podužnom armaturom, slika 1.13, $F_a = 12,32 \text{ cm}^2$, $\mu = 0,77\%$ - $8R\phi 14$



Slika 1.13 - Varijanta utezanja uzengijama

$$\alpha_n = 1 - \frac{8 \times 15,7^2}{6 \times 1169,64} = 0,719$$

$$\alpha_s = 0,793 \quad (s = 7,5)$$

$$\alpha = 0,719 \times 0,793 = 0,570$$

$$\omega_{wd} = \frac{0,5(4 \times 34,2 + 4 \times 24,0) \frac{347,8}{16,67}}{7,5 \times 34,2^2} = 0,277$$

$$\omega_{wd} \geq 0,294 / 0,57 = 0,516 > 0,277$$

Opet nije zadovoljen uslov!

Ovo počinje da nervira, može li se povećati prečnik uzengija, na istom razmaku $s = 7,5 \text{ cm}$?

$$\omega_{wd} = \frac{f_u (4 \times 34,2 + 4 \times 24,0) \frac{347,8}{16,67}}{s \times 34,2^2} = 4,155 f_u / s$$

$$4,155 f_u / s \geq 0,516 \text{ odnosno, } f_u / s > 0,124$$

$$\text{za } s = 7,5 \text{ cm} \rightarrow \text{pot } f_u = 0,124 \times 7,5 = 0,93 \text{ cm}^2$$

odgovara: $2UR\phi 12/7,5$