

# SUVREMENI PRISTUP ZGRADE OPĆENITO

# ZGRADE OTPORNE NA POTRES

## Temeljna načela za idejni projekt

Načela koja se primjenjuju u idejnome projektu u vezi s potresnom opasnošću jesu:

- jednostavnost građevine,
- jednoličnost i simetrija,
- redundantnost (prekobrojnost, prekomjernost, višestruka statička neodređenost nosivih elemenata)
- dvosmjernost otpornosti i krutosti
- torzijska otpornost i krutost
- djelovanje horizontalne dijafragme na razini kata
- prikladni temelji.

# **Temeljna načela idejnoga projekta**

## **Općenito**

Moguća pojava potresa važna je pojava koju se mora uzeti u obzir pri izradbi idejnoga projekta zgrade u potresnome području.

Takvu pojavu valja uzeti u obzir u prvoj fazi izradbe projekta zgrade kako bi se ostvario takav konstrukcijski sustav koji će uz prihvatljive troškove zadovoljiti temeljne zahtjeve

Stoga idejni projekt zgrade u potresnome području mora što je više moguće uključivati slijedeća razmatranja

## **Jednostavnost**

Jednostavnost konstrukcije koja se temelji na postojanju jasnih i izravnih putova prijenosa potresnih sila važna je činjenica koje se valja pridržavati, jer su modeliranje, proračun, dimenzioniranje, oblikovanje pojedinosti i granja jednostavnih konstrukcija izloženi znatno manjim nesigurnostima, pa je stoga i predviđanje njihova ponašanja u potresu mnogo pouzdanije.

## Jednoličnost i simetrija

Jednoličnost, koja je na neki način u odnosu s jednostavnošću, obuhvaća ujednačenu raspodjelu konstrukcijskih elemenata koji će dopustiti kratak i izravan prijenos inercijskih sila koje nastaju u raspodijeljenim masama zgrade. Po potrebi, jednoličnost se može postići podjelom cijele zgrade u dinamički neovisne jedinice, s pomoću seizmičkih razdjelnica (dilatacija).

Jednoličnost konstrukcije po visini zgrade također je važna jer se njome uklanjaju osjetljiva područja u kojima koncentracija naprezanja ili veliki zahtjevi za duktilnošću mogu uzrokovati prerano rušenje.

Mali razmak između središta masa i središta otpornosti i krutosti prirodno uklanja veliku ekscentričnost između mase i krutosti.

Kod simetričnih ili nazovisimetričnih oblika zgrada, simetričan je oblik konstrukcije, dobro raspoređen u tlocrtu, očito rješenje za postizanje jednoličnosti.

Konačno, uporaba ravnomjerno raspoređenih konstrukcijskih elemenata povećava redundantnost (prekobrojnost; prekomjernost nosivih elemenata) i dopušta povoljniju preraspodjelu unutarnjih sila i raspršeno trošenje energije po cijeloj konstrukciji.

## **Dvosmjerna otpornost i krutost**

Horizontalno potresno gibanje dvosmjerna je pojava, pa se stoga konstrukcija zgrade mora moći oduprijeti horizontalnim silama u bilo kojemu smjeru.

Prema tomu, konstrukcijski elementi moraju biti raspoređeni tako da bi se osigurala takva otpornost. Ona se obično postiže postavljanjem elemenata u sustav tlocrtno međusobno okomite mreže nosivih elemenata i osiguravanjem sličnih svojstava otpornosti i krutosti u oba glavna smjera.

Nadalje, izborom krutosti konstrukcije nastoje se smanjiti učinci potresnoga djelovanja (uzevši u obzir posebna svojstva gradilišta) i ograničiti pojava prekomjernih pomaka koji bi mogli dovesti do nestabilnosti zbog učinaka drugog reda ili do velikih oštećenja.

## **Torzijska otpornost i krutost**

Osim horizontalne otpornosti i krutosti, konstrukcija zgrade mora imati prikladnu torzijsku otpornost i krutost kako bi se ograničili torzijski pomaci koji na neravnomjeran način naprežu različite konstrukcijske elemente. U tome smislu jasna se prednost daje rasporedu elemenata u kojemu su oni glavni raspoređeni blizu oboda zgrade.

## Djelovanje dijafragme na razini kata

Stropovi imaju vrlo važnu ulogu u općemu ponašanju zgrada. U stvari, oni djeluju kao horizontalne dijafragme koje ne samo da prikupljaju i prenose inercijske sile do vertikalnih nosivih sustava već osiguravaju da ti sustavi djeluju zajedno pri preuzimanju horizontalnoga djelovanja.

Posljedica toga je da su stropovi bitan dio cijele konstrukcije zgrade i prirodno je da je djelovanje dijafragme posebno važno u slučajevima složenih i neravnomjernih rasporeda vertikalnih konstrukcijskih sustava ili ako su sustavi s različitim svojstvima horizontalne deformabilnosti upotrebljeni zajedno (npr. dvojni sustavi).

Stoga je veoma važno da sustav stropova ima prikladnu krutost i otpornost u svojoj ravnini i da ima učinkovite spojeve s vertikalnim konstrukcijskim sustavima. U tome smislu posebnu brigu valja posvetiti razvedenim ili vrlo izduženim tlocrtnim oblicima i slučajevima velikih otvora u stropovima, posebno ako su oni smješteni u blizini glavnih vertikalnih konstrukcijskih elemenata, jer oni sprečavaju učinkovitost spojeva.

## **Prikladno temeljenje**

Proračunom i izvedbom temelja i spojeva s gornjom konstrukcijom mora se osigurati da cijela zgrada bude pri potresu jednolično pobuđena.

Stoga se, za konstrukcije koje su sastavljene od određenoga broja nosivih zidova koji se razlikuju po duljini i krutosti, mora odabrati kruti ili sandučasti temelj u kojemu stijenke (zidovi) povezuju temeljnu i stropnu ploču.

Za zgrade s pojedinačnim temeljima (samci ili piloti) treba razmotriti uporabu temeljne ploče ili horizontalnih veznih greda između temelja u oba glavna smjera.

## Pravilnost građevine

U proračunu otpornosti na potres konstrukcije zgrada dijele se na pravilne i nepravilne.

Ta podjela ima posljedice na ove elemente potresnoga proračuna:

- **model konstrukcije**, koji može biti ili pojednostavljen ravninski ili prostorni
- **metoda proračuna**, koja može biti ili pojednostavnjena modalna ili višemodalna
- **vrijednost faktora ponašanja  $q$** , koji se može smanjiti ovisno o vrsti nepravilnosti po visini

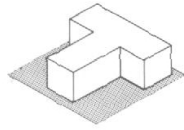
S obzirom na posljedice konstrukcijske pravilnosti na proračun, posebno se razmatraju svojstva pravilnosti zgrade u tlocrtu i po visini u tablici

**Tablica – Posljedice konstrukcijske pravilnosti na proračun**

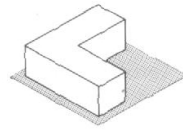
Pravilnost		Dopuštena pojednostavnjenja		Faktor ponašanja
Tlocrt	Po visini	Model	Proračun	
da	da	ravninski	pojednostavnjen	propisan
da	ne	ravninski	višemodalni	smanjen
ne	da	prostorni	višemodalni	propisan
ne	ne	prostorni	višemodalni	smanjen



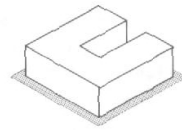
### A. BUILDINGS WITH IRREGULAR CONFIGURATION



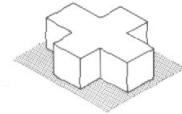
T-shaped plan



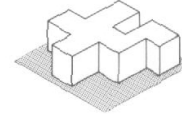
L-shaped plan



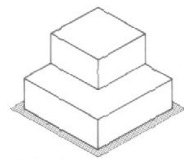
U-shaped plan



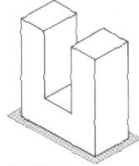
Cruciform plan



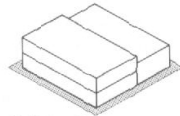
Other complex shapes



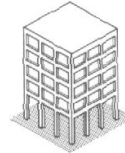
Setbacks



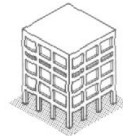
Multiple towers



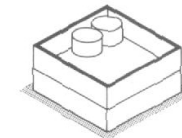
Split levels



Unusually high story

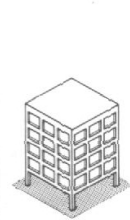


Unusually low story

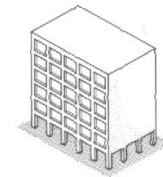


Outwardly uniform appearance but nonuniform mass distribution, or converse

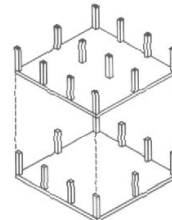
### B. BUILDINGS WITH ABRUPT CHANGES IN LATERAL RESISTANCE



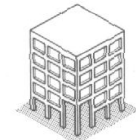
"Soft" lower levels



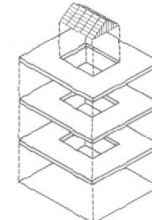
Large openings in shear walls



Interruption of columns

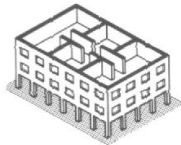


Interruption of beams

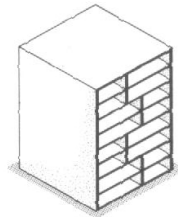


Openings in diaphragms

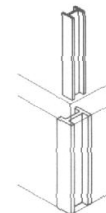
### C. BUILDINGS WITH ABRUPT CHANGES IN LATERAL STIFFNESS



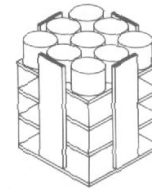
Shear walls in some stories, moment-resisting frames in others



Interruption of vertical-resisting elements

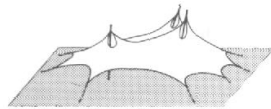


Abrupt changes in size of members



Drastic changes in mass/stiffness ratio

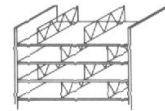
### D. UNUSUAL OR NOVEL STRUCTURAL FEATURES



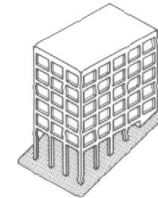
Cable-supported structures



Shells



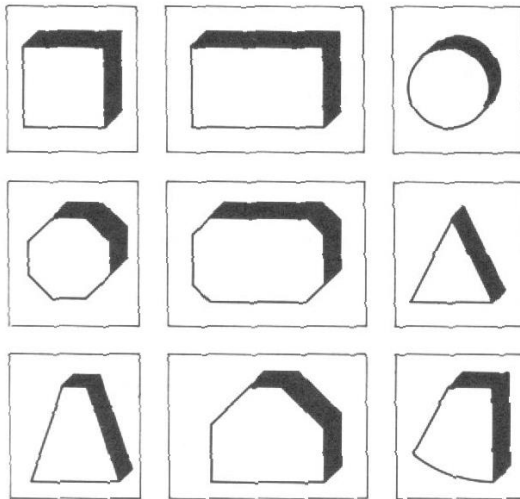
Staggered trusses



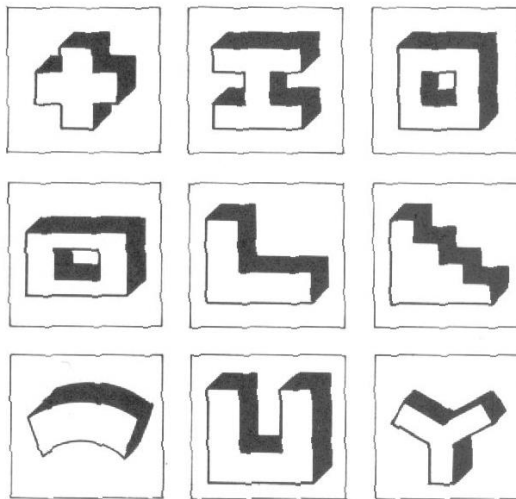
Buildings on hillsides

## PLANS

### SIMPLE

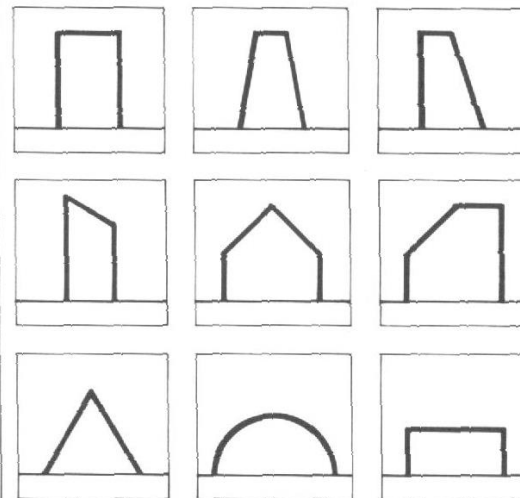


### COMPLEX

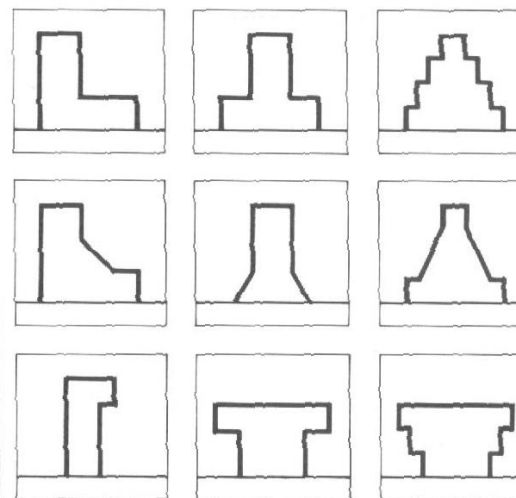


## ELEVATIONS

### SIMPLE



### COMPLEX



# Kriteriji pravilnosti u tlocrtu

Konstrukcija zgrade **približno** je **simetrična** u tlocrtu u odnosu **na dva okomita smjera**, što se odnosi na **horizontalnu krutost i raspodjelu masa**.

Konfiguracija je tlocrta **zbijena**, tj. nema razvedenih oblika kao što su **H, I, X** itd.

Konfiguracija tlocrta treba biti kompaktna, primjerice tako da svaki kat treba biti omeđen konveksnim poligonom. Ako u tlocrtu postoje udubljenja (ulazi, uvučeni bridovi), pravilnost u tlocrtu može se i dalje smatrati zadovoljavajućom, pod uvjetom da ta udubljenja ne utječu na tlocrtnu krutost kata i da, za svako udubljenje, površina između vanjske obujmice kata i konveksnih poligonalnih pravaca koji obuhvaćaju kat ne premašuje 5% površine stropa.

Krutost stropova u vlastitoj ravnini dovoljno je velika u usporedbi s horizontalnom krutošću vertikalnih konstrukcijskih elemenata, tako da deformacija stropa ima mali učinak na raspodjelu sila na vertikalne konstrukcijske elemente.

Vitkost  $\lambda = L_{\max} / L_{\min}$  zgrade u tlocrtu ne treba biti veća od 4, gdje je  $L_{\max}$  duža a  $L_{\min}$  kraća izmjera tlocrta zgrade, mjerene u okomitom smjeru.

## Kriteriji pravilnosti po visini

Svi nosivi sustavi koji prenose horizontalne sile, kao što su jezgre, nosivi zidovi ili okviri **neprekinuti** su od temelja do vrha zgrade ili, ako u nekim visinama postoje istaci, oni se protežu do vrha područja zgrade.

Horizontalna krutost i mase pojedinih katova stalne su ili se postupno smanjuju od temelja do vrha bez naglih promjena.

Za okvirne zgrade omjer stvarne katne otpornosti i otpornosti zahtijevane proračunom ne smije se nesrazmjerno mijenjati između susjednih katova.

Ako postoje suženja ili istaci primjenjuju se sljedeće dodatne odredbe:

- a) U slučaju postupnih suženja kojima je očuvana osna simetrija, suženje u bilo kojemu katu ne smije biti veće od 20 % tlocrtnih izmjera nižega kata.
- b) U slučaju pojedinačnog istaka unutar donjih 15 % ukupne visine glavnoga nosivog sustava, istak ne smije biti veći od 50 % tlocrtnih izmjera gornjega kata. U takvome slučaju (ako je istak veći), konstrukciju u području podnožja unutar vertikalne projekcije opsega gornjih katova treba proračunati na najmanje 75 % horizontalne poprečne sile koja bi nastala u tome području u sličnoj zgradi bez proširenja podnožja.
- c) Ako je suženjem poremećena simetrija, u svakoj strani zbroj suženja u svim katovima ne smije premašiti 30 % tlocrtnih izmjera na prvome katu, a pojedina suženja ne smiju biti veća od 10 % prethodnih tlocrtnih izmjera nižega kata.

(6) Za svaku razinu (kat) i svaki smjer proračuna,  $x$  i  $y$ , ekscentričnost konstrukcije  $e_0$  i torzijski polumjer  $r$  moraju biti u skladu s dva uvjeta prikazana za proračun u smjeru  $y$ :

$$e_{0x} \leq 0,30 r_x \quad (4.1a)$$

$$r_x \geq l_s \quad (4.1b)$$

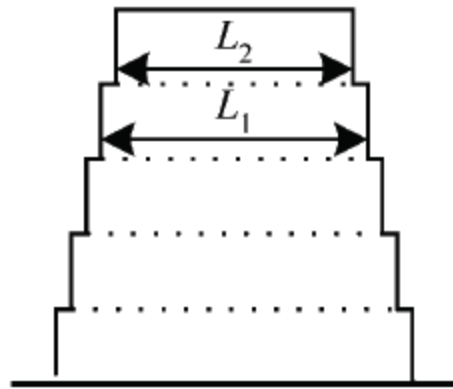
gdje je:

$e_{0x}$  udaljenost između središta krutosti i središta masa mjerena uzduž osi  $x$ , okomito na smjer proračuna

$r_x$  drugi korijen omjera torzijske krutosti i bočne krutosti u smjeru  $y$  (polumjer torzije)

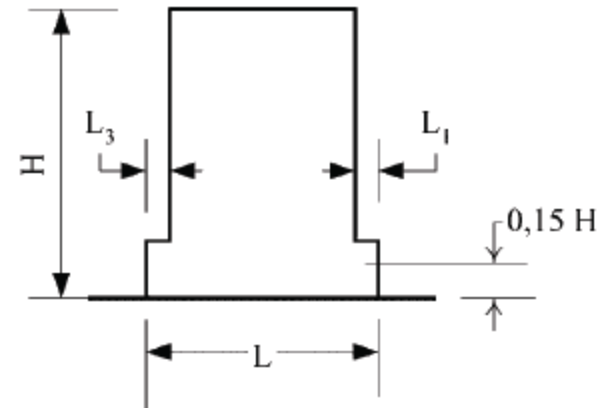
$l_s$  polumjer inercije (gyration) mase stropa u tlocrtu (drugi korijen omjera (a) polarnog momenta tromosti mase kata u tlocrtu s obzirom na središte masa kata i (b) mase kata).

(a)



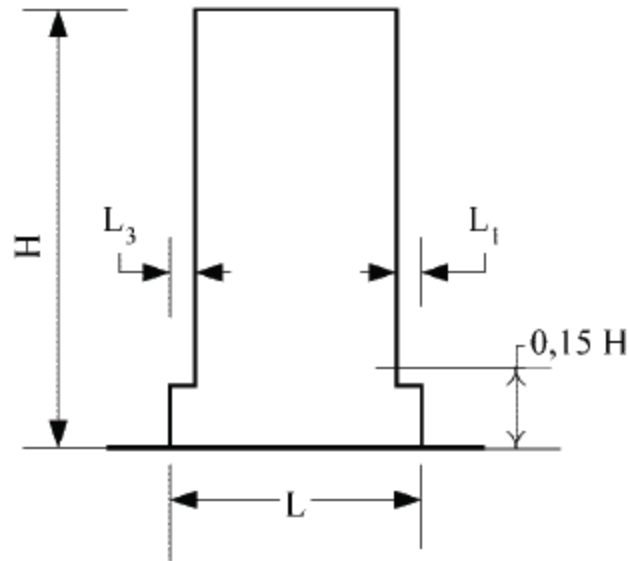
Criterion for (a):  $\frac{L_1 - L_2}{L_1} \leq 0,20$

(b) (setback occurs above  $0,15H$ )



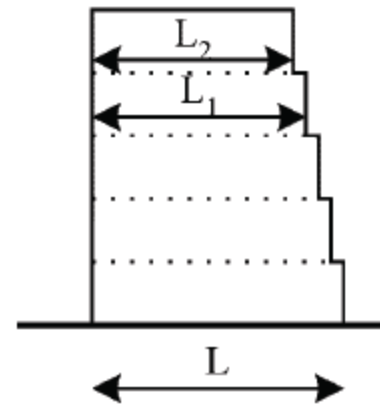
Criterion for (b):  $\frac{L_3 + L_1}{L} \leq 0,20$

(c) (setback occurs below  $0,15H$ )



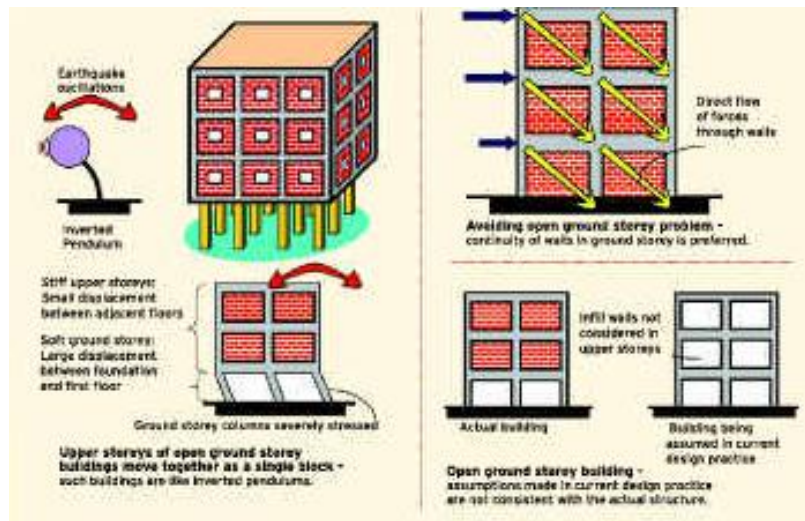
Criterion for (c):  $\frac{L_3 + L_1}{L} \leq 0,50$

d)



Criteria for (d):  $\frac{L - L_2}{L} \leq 0,30$

$\frac{L_1 - L_2}{L_1} \leq 0,10$

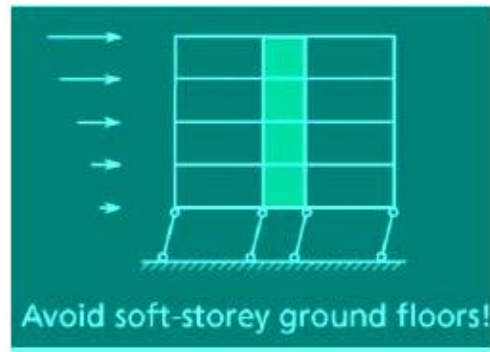




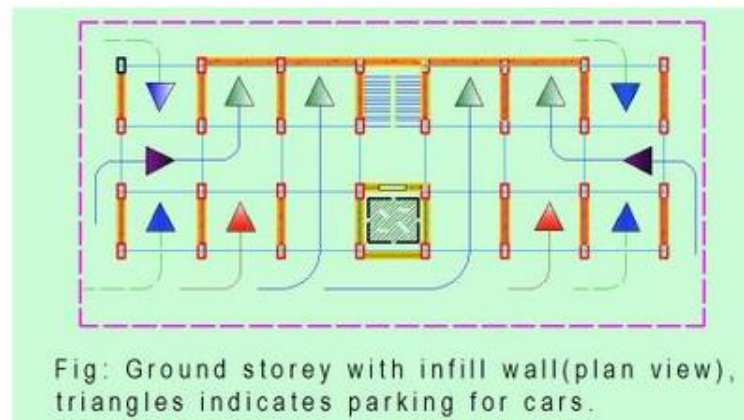
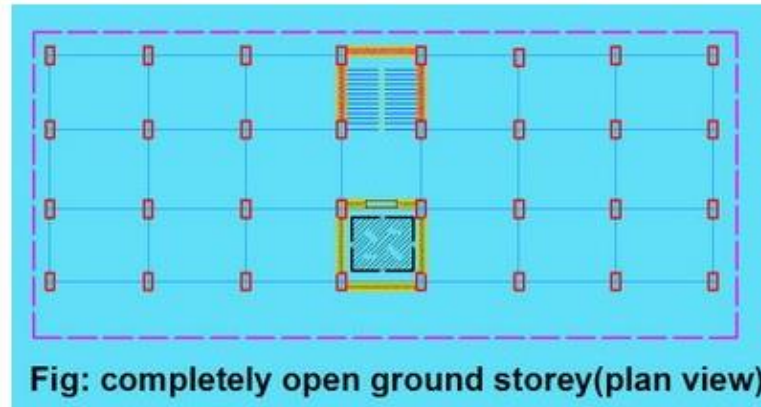




a) To avoid soft storey

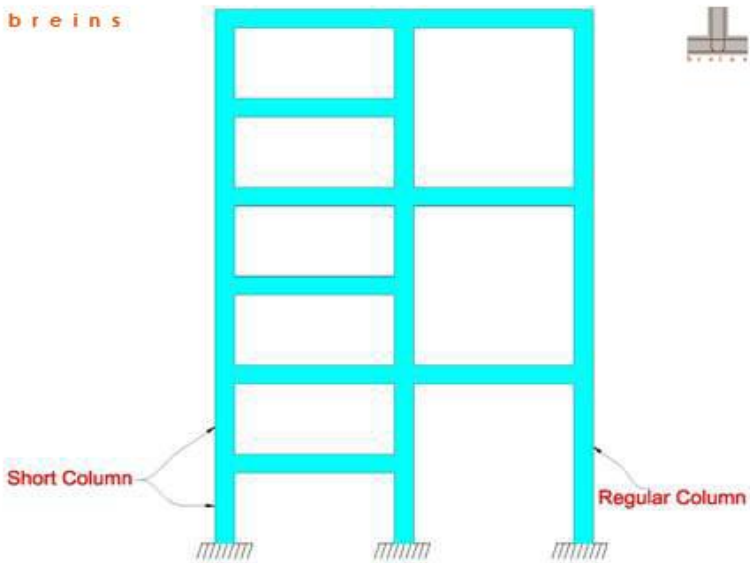


b) When soft storey cannot be avoided, providing special design provision in designing such structure.

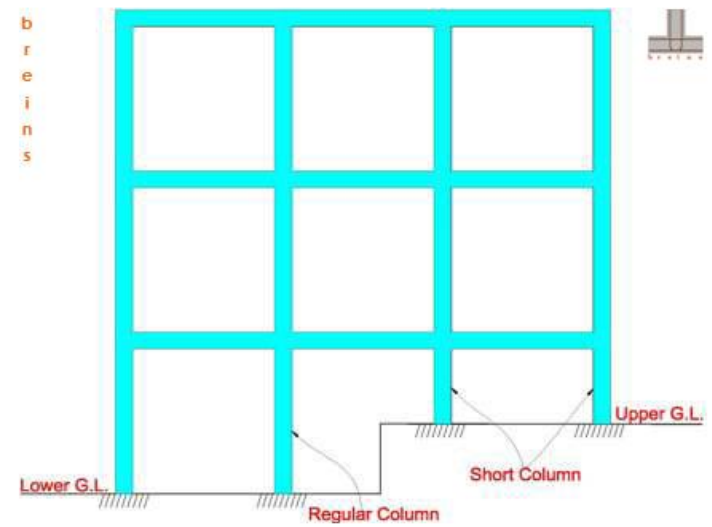




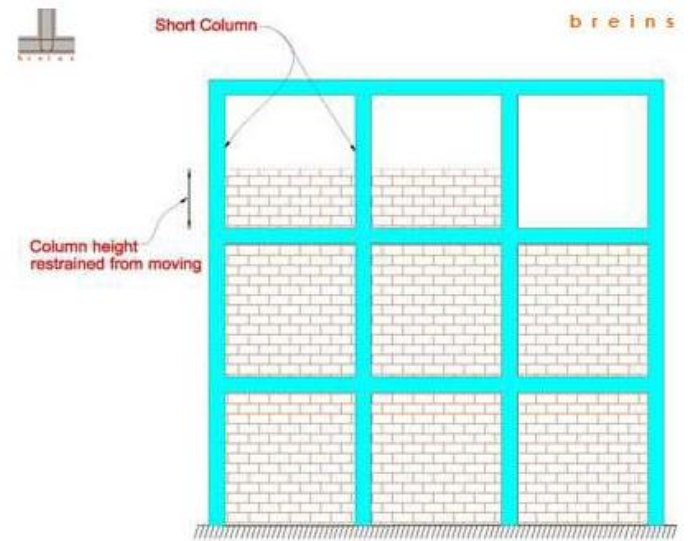
Short columns are relatively stiff in comparison to other regular columns due to their lower effective heights hence have increased Seismic Demand. These columns attract higher value of earthquake induced forces than their counterparts; thereby making it highly vulnerable in earthquakes. This effect is termed as "Short Column Effect" in frame structures.



**Fig-11 (Formation of short columns due to intermediate staircase landing beams in between two floors)**



**Fig-12 (Formation of short columns due to variation of column heights at the ground floor due to difference in ground level)**



**Fig-13 (Formation of short columns due to partial height of brick masonry infill walls)**

Short Columns demand special attention in building structures. As far as possible, such configuration shall be avoided during planning phase itself, as failure of such columns could be quite brittle in nature hence disastrous. In RC structures, special shear confining reinforcements are necessary in such columns.

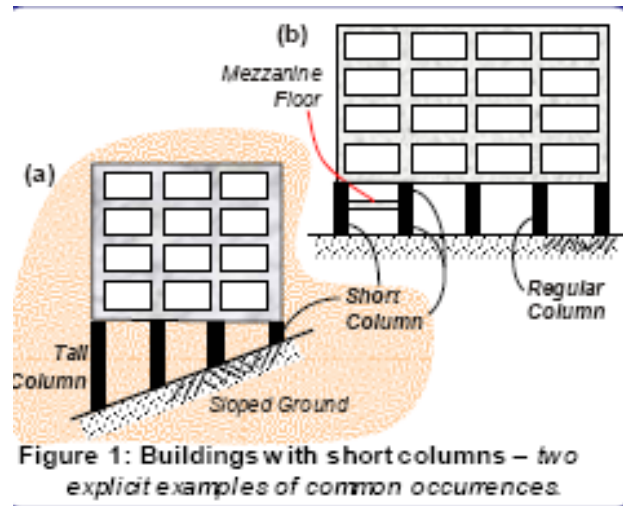


Figure 1: Buildings with short columns – two explicit examples of common occurrences.

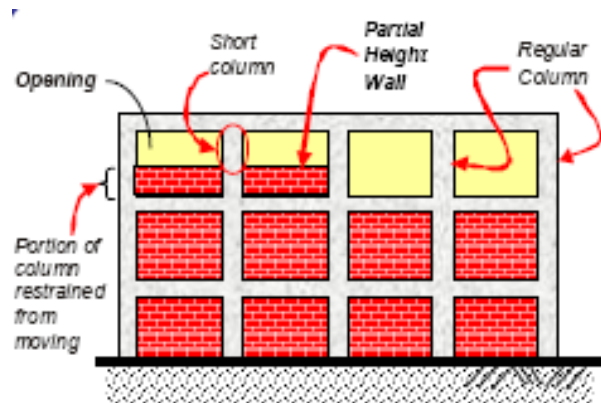


Figure 3: Short columns effect in RC buildings when partial height walls adjoin columns – the effect is implicit here because infill walls are often treated as non-structural elements.

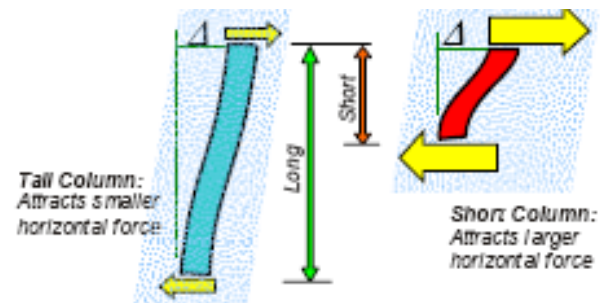


Figure 2: Short columns are stiffer and attract larger forces during earthquakes – this must be accounted for in design.



Figure 4: Effective height of column over which it can bend is restricted by adjacent walls – this short-column effect is most severe when opening height is small.





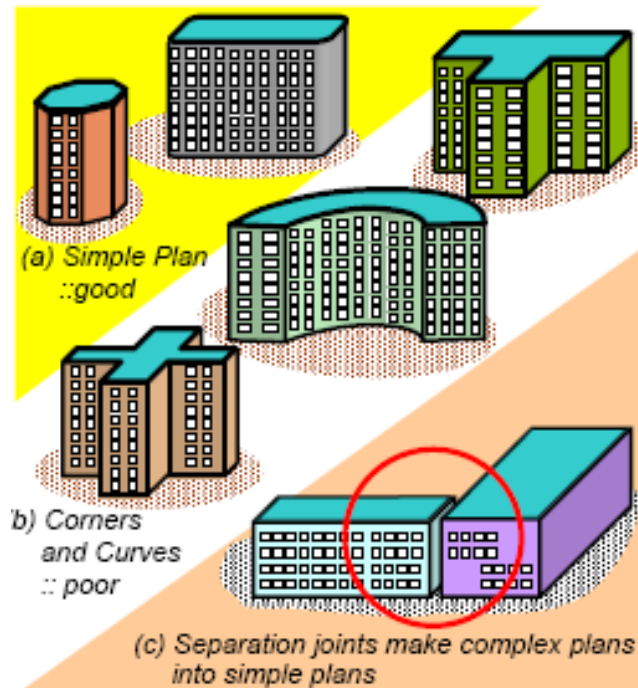
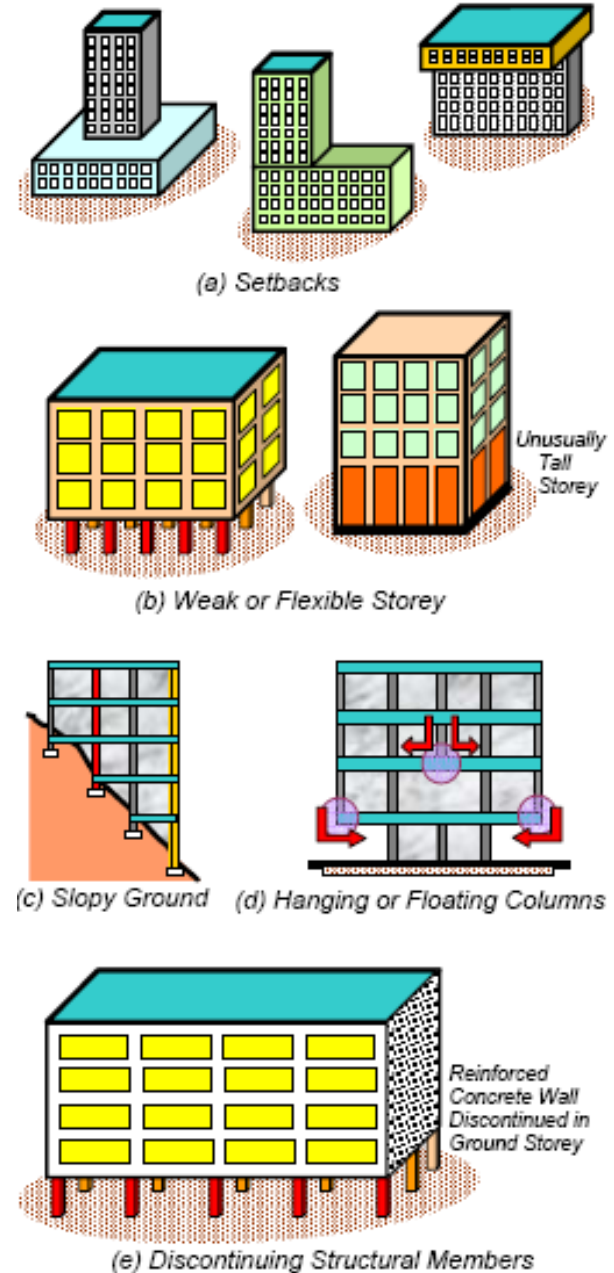
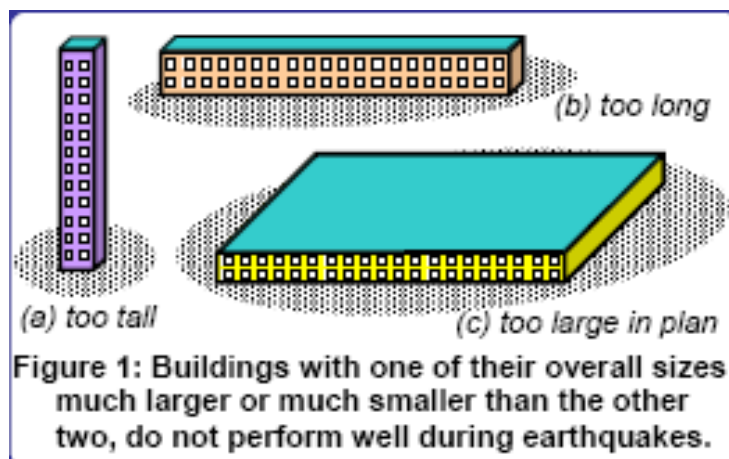


Figure 3: Sudden deviations in load transfer path along the height lead to poor performance of buildings.

# Proračun

## Modeliranje

Model zgrade mora na odgovarajući način prikazati raspodjelu krutosti i mase tako da su pri razmatranome potresnom djelovanju uzeti u obzir na primjeren način svi značajni oblici deformacija i inercijske sile.

Općenito, smatra se da se konstrukcija sastoji od niza sustava koji prenose vertikalna i horizontalna opterećenja, a povezani su horizontalnim dijafragmama.

Ako su stropne dijafragme zgrade dovoljno krute u vlastitoj ravnini, mogu se mase i momenti tromosti svakoga kata koncentrirati u središtu masa, čime se smanjuje broj stupnjeva slobode na tri po katu (dva horizontalna pomaka i rotacija oko vertikalne osi).

Za zgrade koje zadovoljavaju kriterije pravilnosti u tlocrtu proračun se može provesti primjenom **dvaju ravninskih modela**, jedan za svaki glavni smjer.

Ako se ne provodi točniji proračun raspucalih elemenata, smije se uzeti da je elastična krutost pri savijanju i posmiku betonskih i zidanih elemenata jednaka polovini odgovarajuće krutosti neraspucalih elemenata.

Zidovi ispune koji znatno povećavaju horizontalnu krutost zgrade trebaju se uzeti u obzir.

Deformabilnost temeljnoga tla treba u modelu uzeti u obzir uvijek kad može imati nepovoljan utjecaj na odziv konstrukcije.

Mase se računaju iz vertikalnog opterećenja prema kombinaciji djelovanja

## Slučajni torzijski učinci

Kao dodatak stvarnoj ekcentričnosti, da bi se obuhvatile nesigurnosti razmještaja masa i prostorna promjenljivost potresnoga djelovanja uzima se da je proračunsko središte masa svakoga kata ( $i$ ) pomaknuto sa svoga početnog mjesta u svakome smjeru za dodatnu slučajnu ekscentričnost:

$$e_{1i} = \pm 0,05 L_i$$

gdje je:

- $e_{1i}$  slučajna ekscentričnost katne mase " $i$ " od njezina početnog mjesta, a uzima se u istome smjeru za sve katove
- $L_i$  izmjera kata okomito na smjer potresnoga djelovanja.

## Metode proračuna

Temeljna metoda za proračun potresnih sila (modalni odziv) koristi se proračunskim spektrom, a za određivanje potresnih unutarnjih sila upotrebljava se linearni elastični model konstrukcije.

Ovisno o konstrukcijskim svojstvima zgrade, može se upotrijebiti jedan od ove dvije vrste proračuna:

- "pojednostavnjeni modalni proračun odziva"
- "višemodalni proračun odziva"

Osim tih osnovnih metoda dopuštene su i druge metode proračuna konstrukcije kao što su:

- nelinearni statički proračun postupnim guranjem;
- nelinearni dinamički proračun primjenom vremenskog zapisa

Nelinearni se proračun može primijeniti uz pretpostavku da je na odgovarajući način potkrijepljen ulaznim podacima potresa, konstitutivnim modelom, metodom tumačenja rezultata proračuna i zahtjeva koje valja zadovoljiti.

Ako se primjenjuje nelinearni proračun, potrebno je amplitude ubrzanja koje proizlaze iz referentnoga povratnog perioda množiti faktorom važnosti  $\gamma$  zgrade.



## Pojednostavnjeni modalni proračun odziva

Ta vrsta proračuna može se primijeniti na zgrade koje se mogu proračunati s dva ravninska modela čiji odziv nije znatnije pod utjecajem doprinosa viših oblika vibracija.

Smatra se da te uvjeta zadovoljavaju **zgrade koje zadovoljavaju kriterije pravilnosti u tlocrtu i po visini i imaju osnovni period vibracija  $T_1$  u dva glavna smjera manji od**

$$T_1 \leq \begin{cases} 4 T_c \\ 2,0 \text{ s} \end{cases}$$

## Ukupna potresna poprečna sila

Ukupna potresna poprečna sila  $F_b$  za svaki glavni smjer određuje se formulom:

$$F_b = S_d(T_1) m \lambda$$

gdje je:

$S_d(T_1)$  ordinata proračunskog spektra za period  $T_1$

$T_1$  osnovni period vibracija zgrade za horizontalno poprečno gibanje u promatranome smjeru

$m$  ukupna masa zgrade

$\lambda$  korekcijski faktor –  $\lambda=0.85$  ako je  $T_1 \leq 2T_c$  i kada ima više od 2 kata; inače  $\lambda=1.0$

Za određivanje osnovnoga perioda vibracija  $T_1$  obaju ravninskih modela zgrade mogu se upotrijebiti približne formule utemeljene na metodama dinamike konstrukcija.

# Približne formule za proračun prvoga perioda vibracije zgrada

## Formula 1

Za zgrade do visine do 80 m vrijednost  $T_1$  može se približno izračunati prema formuli:

$$T_1 = C_t H^{3/4}$$

gdje je:

$$\begin{array}{ll} T_1 & \text{osnovni period vibracija zgrade u s} \\ C_t = \begin{cases} 0,085 & \text{za prostorne čelične okvire} \\ 0,075 & \text{za prostorne armiranobetonske okvire i ekscentrično} \\ & \text{ukružene čelične okvire} \\ 0,050 & \text{za sve druge građevine} \end{cases} \\ H & \text{visina zgrade u m.} \end{array}$$

Vrijednost  $C_t$  za zgrade s armiranobetonskim ili zidanim nosivim zidovima može se izračunati prema formuli:

$$C_t = 0,075 / \sqrt{A_c}$$

uz

$$A_c = \sum [A_i (0,2 + (\ell_{wi} / H))^2]$$

gdje je

$A_c$  ukupna proračunska ploština nosivih zidova u prvome katu zgrade u  $m^2$

$A_i$  proračunska ploština presjeka nosivog zida "i" u prvome katu zgrade u  $m^2$

$\ell_{wi}$  duljina nosivog zida "i" u prvome katu u smjeru usporednom s djelovanjem sila u m uz ograničenje da  $\ell_{wi} / H$  ne smije premašiti 0,9.

## Formula 2

Procjena  $T_1$  može se načiniti i primjenom ove formule:

$$T_1 = 2 \sqrt{d}$$

gdje je:

$T_1$  osnovni period vibracija zgrade u s

$d$  horizontalni pomak vrha zgrade u metrima zbog vertikalnog opterećenja za koje se uzima da djeluje horizontalno.

## Raspodjela horizontalnih potresnih sila

Osnovni oblici vibracija obaju ravninskih modela zgrade mogu se računati primjenom metoda dinamike konstrukcija ili se mogu dobiti približno iz horizontalnih pomaka koji se linearno povećavaju po visini zgrade.

Unutarnje sile prouzročene potresom određuju se opterećenjem dvaju ravninskih modela horizontalnim silama  $F_i$  na svim katovima.

Sile se određuju uz pretpostavku da je ukupna masa građevine zamijenjena masom za osnovni oblik vibracija, dakle:

$$F_i = F_b (s_i m_i) / (\sum s_j m_j)$$

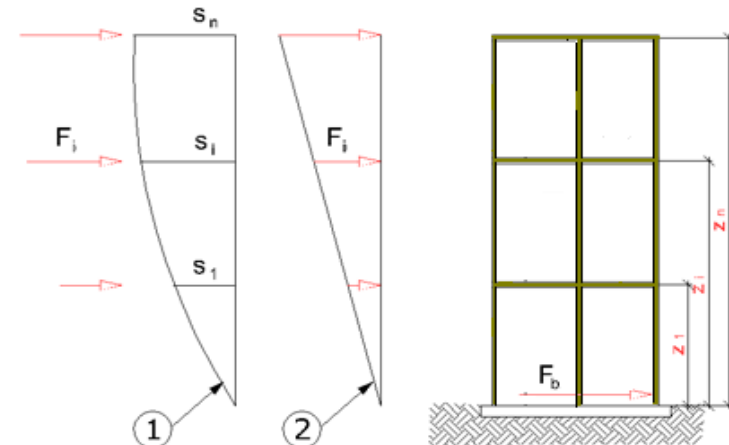
gdje je:

$F_i$  horizontalna sila koja djeluje na katu "i"

$F_b$  ukupna poprečna sila

$s_i, s_j$  pomaci masa  $m_i, m_j$  u osnovnome obliku vibracija

$m_i, m_j$  katne mase



Kad se osnovni oblik vibracija prikazuje približno s pomoću horizontalnih pomaka koji se linearno povećavaju po visini, horizontalne sile  $F_i$  dane su jednačom:

$$F_i = F_b (z_i m_i) / (\sum z_j m_j)$$

gdje je:

$z_i, z_j$  visina masa  $m_i, m_j$  iznad razine potresnoga djelovanja (temelj).

Horizontalne sile  $F_i$  određene na gornji način raspodjeljuju se na nosive sustave koji prenose horizontalne sile uz pretpostavku krutih stropova.

## Torzijski učinci

U slučaju kad postoji simetrična raspodjela horizontalne krutosti i mase i kad se ne upotrebljava točnija metoda slučajni torzijski učinci mogu se uzeti u obzir povećanjem unutarnjih sila u pojedinim nosivim elementima s faktorom  $\delta$  koji je dan izrazom:

$$\delta = 1 + 0,6 x / L_e$$

gdje je:

- $x$       razmak između promatranog elementa i središta zgrade mjereno okomito na smjer promatranoga potresnog djelovanja
- $L_e$      razmak između dva krajnja nosiva elementa mjereno kao gore.

## Višemodalni proračun odziva

Ta se vrsta proračuna primjenjuje za zgrade koje ne zadovoljavaju uvjete za primjenu pojednostavnjenoga proračuna.

Za zgrade koje zadovoljavaju kriterije pravilnosti u tlocrtu proračun se može provesti s pomoću dvaju ravninskih modela, jedan za svaki glavni smjer.

Zgrade koje ne zadovoljavaju te kriterije proračunavaju se primjenom prostornog modela.

Kad se upotrebljava prostorni model, uzima se da **potresna djelovanja djeluju u svim mjerodavnim horizontalnim smjerovima** (u odnosu na konstrukcijski oblik zgrade) i **horizontalnom smjeru okomito na njega**.

Ako zgrade imaju nosive elemente u dva okomita smjera, ta se dva smjera smatraju mjerodavnim.

U obzir se uzima odziv svih oblika vibracija koji znatno doprinose ukupnomu odzivu i to tako.

- da je zbroj svih (efektivnih modalnih) masa za oblike vibracija koji se razmatraju jednak najmanje 90 % ukupne mase zgrade
- da su u obzir uzeti svi oblici vibracija s (efektivnim modalnim) masama većim od 5 % ukupne mase.

**NAPOMENA** (efektivna modalna) masa  $m_k$  koja odgovara obliku vibracija  $k$  određuje se tako da se ukupna poprečna sila  $F_{bk}$  koja djeluje u smjeru u kojemu i potresno djelovanje izračuna iz  $F_{bk} = S_d(T_k) m_k g$ . Može se pokazati da je zbroj (efektivnih modalnih) masa za sve oblike i dani smjer jednak masi konstrukcije.

Kad se upotrebljava prostorni model, gornji uvjeti moraju se provjeriti za svaki mjerodavni smjer.

Općenito najmanji broj oblika vibracija  $k$  koji se razmatra u prostornome proračunu mora zadovoljiti uvjete:

$$k \geq 3\sqrt{n}$$

i

$$T_k \leq 0,20 \text{ s}$$

gdje je:

- $k$  broj promatranih oblika vibracija
- $n$  broj katova (etaža) nad tlom
- $T_k$  period vibracija  $k$ -tog oblika vibracija.

# Kombinacije modalnih odziva

Odzivi konstrukcije u dva oblika vibracija  $i$  i  $j$  (uključujući oba poprečna i torzijski oblik) mogu se smatrati **međusobno neovisnim** ako njihovi periodi  $T_i$  i  $T_j$  zadovoljavaju uvjet:

$$T_j \leq 0,9 T_i$$

Kad se svi mjerodavni odzivi mogu smatrati međusobno neovisnim, uzima se da je **najveća vrijednost  $E_E$  unutarnjih sila jednaka**

$$E_E = \sqrt{\sum E_{Ei}^2}$$

gdje je:

$E_E$  promatrane unutarnje sile (sile, pomaci itd)

$E_{Ei}$  vrijednost unutarnjih sila u obliku vibracija " $i$ ".

Inače treba usvojiti točnije postupke za proračun najveće vrijednosti unutarnjih sila (npr. "potpunu kvadratnu kombinaciju") (CQC).



## Torzijski učinci

Kad se u proračunu primjenjuje prostorni model, slučajni torzijski učinci mogu se odrediti kao ovojnica učinaka koji proizlaze iz statičkog proračuna, a sastoje se od torzijskih momenata  $M_{1i}$  oko vertikalne osi za svaki kat "i":

$$M_{1i} = e_{1i} F_i$$

gdje je:

$M_{1i}$  torzijski moment kata "i" oko njegove vertikalne osi

$e_{1i}$  slučajna ekscentričnost katne mase "i" za sve mjerodavne smjerove

$F_i$  horizontalna sila koja djeluje na katu "i" za sve mjerodavne smjerove.

Učinak opterećenja mora se razmotriti s promjenljivim predznakom (istim za sve katove).

## Druge metode proračuna

Ako se upotrebljavaju druge metode proračuna, mora se pokazati da su **zadovoljeni temeljni zahtjevi** na način da

- a) da je zbroj proračunanih horizontalnih poprečnih sila svih oslonaca (**ukupna poprečna sila**) u svakome od dva okomita smjera veći od **80% odgovarajućeg zbroja dobivenog višemodalnim proračunom**
- b) ako je **zbroj u svakome smjeru manji od 80 % vrijednosti iz višemodalnoga proračuna**, moraju se proračunane vrijednosti svih veličina pomnožiti faktorom koji će ukupnu poprečnu silu dovesti na razinu da bude zadovoljen uvjet iz a).

## Proračun vremenskim zapisom

Odziv građevine ovisan o vremenu može se dobiti **izravnom numeričkom integracijom njezinih diferencijalnih jednadžba gibanja**, uporabom **akcelerograma**.

# Nelinearni statički proračun (postupno guranje)

Proračun postupnim guranjem nelinearni je statički proračun koji se provodi za stalna gravitacijska opterećenja i monotono rastuća horizontalna opterećenja.

Smije se primijeniti za provjeru ponašanja konstrukcija novo projektiranih i postojećih zgrada sa sljedećom svrhom:

a) radi provjere ili kontrole vrijednosti omjera prekomjerne čvrstoće  $a_u / a_1$

$a_1$  i  $a_u$  definirani su ovako:

$a_1$  vrijednost kojom se množi horizontalno potresno proračunsko djelovanje kako bi se prvo dostigla otpornost na savijanje u svakom elementu konstrukcije dok sva druga proračunska djelovanja ostaju konstantna

$a_u$  vrijednost kojom se množi horizontalno potresno proračunsko djelovanje kako bi u određenom broju presjeka, dovoljnom za razvoj ukupne nestabilnosti konstrukcije nastali plastični zglobovi, pri čemu sva ostala proračunska djelovanja ostaju stalna.

b) za procjenu očekivanih plastičnih mehanizama i raspodjelu oštećenja

c) za ocjenu ponašanja konstrukcija postojećih ili obnovljenih zgrada u smislu norme EN 1998-3

d) kao druga mogućnost proračuna prema linearno-elastičnom proračunu u kojem se upotrebljava faktor ponašanja  $q$ .

Zgrade koje nisu sukladne s kriterijima pravilnosti moraju se proračunati upotrebom prostornog modela.

Smiju se provesti dva neovisna proračuna s bočnim opterećenjima samo u jednom smjeru.

## **Bočna opterećenja**

Treba primijeniti najmanje dvije vertikalne raspodjele bočnih opterećenja:

- "jednoličnu" raspodjelu koja se temelji na bočnim silama srazmjernim masi neovisno o visini (jednolično ubrzanje po visini)
- "modalnu" raspodjelu srazmjernu bočnim silama spojivim s raspodjelom bočne sile u promatranom smjeru određenu elastičnim proračunom

## **Krivulja sposobnosti nosivosti**

Proračunom postupnog guranja treba odrediti odnos između poprečne sile u podnožju i kontrolnog pomaka ("krivulja sposobnosti nosivosti") za vrijednost kontrolnog pomaka za raspon vrijednosti od nule do vrijednosti jednake 150 % ciljanoga pomaka

Ciljani pomak mora se definirati kao zahtjev izveden iz elastičnog spektra odziva kao pomak istovrijednog sustava s jednim stupnjem slobode.

# Kombinacija komponenata potresnoga djelovanja

## Horizontalne komponente potresnoga djelovanja

Općenito se uzima da **horizontalne komponente potresnoga djelovanja djeluju istodobno**.

Kombinacija horizontalnih komponenti potresnoga djelovanja može se uzeti u obzir ovako:

1. – **Odziv građevine za svaku se horizontalnu komponentu izračuna odvojeno** primjenom pravila kombinacije za modalni odziv
- Najveće vrijednosti unutarnjih sila u konstrukciji zbog djelovanja dviju horizontalnih komponenata potresnoga djelovanja mogu se proračunati kao drugi korijen zbroja kvadrata odziva za svaku horizontalnu komponentu.
2. Druga je mogućnost da se proračunaju **unutarnje sile iz kombinacije (zbroja) horizontalnih komponenata potresnoga djelovanja** prema formulama:

a)  $E_{Edx} \quad "+" \quad 0,30 \ E_{Edy}$

b)  $0,30 \ E_{Edx} \quad "+" \quad E_{Edy}$

gdje je:

"+" podrazumijeva se "kombinirati s"

$E_{Edx}$  unutarnje sile od potresnoga djelovanja u smjeru osi x konstrukcije

$E_{Edy}$  unutarnje sile od potresnoga djelovanja u smjeru osi y konstrukcije

U gornjim kombinacijama za promatrane se učinke uzima najnepovoljniji predznak svake komponente.

Za zgrade koje zadovoljavaju kriterije pravilnosti u tlocrtu i kod kojih su zidovi jedini elementi koji preuzimaju horizontalne sile može se uzeti da potresno djelovanje djeluje odvojeno uzduž dvije glavne okomite horizontalne osi građevine.

Kad se provodi proračun s pomoću vremenskog zapisa i primjenjuje prostorni model konstrukcije moraju se uzeti u obzir istodobno djelujući akceleroگرامi za obje horizontalne komponente.

## Vertikalna komponenta potresnoga djelovanja

Ako je  $a_{vg}$  veće od  $0,25g$  ( $2,5 \text{ m/s}^2$ ), vertikalna komponenta potresnoga djelovanja uzima se u obzir u ovim slučajevima:

- za horizontalne ili približno horizontalne konstrukcijske elemente **raspona 20 ili više metara,**
- za horizontalne ili približno **horizontalne konzolne elemente dulje od 5 m**
- za horizontalne ili približno **horizontalne prednapete elemente**
- za **grede koje nose stupove**
- za konstrukcije s izolacijom u podnožju.

Općenito, proračun kojim se utvrđuju učinci vertikalne komponente potresnoga djelovanja može se provesti na pojedinim dijelovima modela građevine u koji su uključeni promatrani elementi, a u obzir je uzeta i krutost susjednih elemenata.

Učinci vertikalne komponente trebaju se uzeti u obzir samo za promatrane elemente i njima izravno pridružene ležajne elemente ili potkonstrukciju.

Ako su za takve elemente mjerodavne i horizontalne komponente potresnoga djelovanja, za proračun unutarnjih sila upotrebljavaju se ove tri kombinacije:

- a)  $0,30 E_{Edx}$  "+"  $0,30 E_{Edy}$  "+"  $E_{Edz}$
- b)  $E_{Edx}$  "+"  $0,30 E_{Edy}$  "+"  $0,30 E_{Edz}$
- c)  $0,30 E_{Edx}$  "+"  $E_{Edy}$  "+"  $0,30 E_{Edz}$

## Proračun pomaka

Pomak koji nastaje zbog proračunskoga potresnog djelovanja računa se na temelju elastične deformacije konstrukcijskog sustava prema ovoj pojednostavnjenoj formuli:

$$d_s = q_d d_e$$

gdje je:

$d_s$  pomak točke konstrukcijskog sustava zbog proračunskoga potresnog djelovanja

$q_d$  faktor ponašanja za pomak koji je jednak  $q$ ,

$d_e$  pomak iste točke konstrukcijskog sustava određen linearnim proračunom utemeljenim na proračunskome spektru odziva

Pri određivanju pomaka  $d_e$  moraju se uzeti u obzir torzijski učinci potresnoga djelovanja.

## Nekonstrukcijski elementi

Nekonstrukcijski elementi zgrada (npr. parapeti, zabati, strojarski dodaci i oprema, razdjelni i pregradni zidovi, ograde), koji u slučaju sloma mogu **ugroziti osobe ili glavnu konstrukciju zgrade ili instalacije kritičnih uređaja**, moraju se provjeriti zajedno s njihovim osloncima, kako bi bili otporni na proračunsko potresno djelovanje.

**U slučaju važnih ili posebno opasnih nekonstrukcijskih elemenata**, proračun otpornosti na potres mora se provesti **realnim modeliranjem konstrukcije i primjenom prikladnog spektra odziva** dobivenog iz odziva podupirućih konstrukcijskih elemenata glavnog sustava koji preuzima potres.



## Proračun

Učinci potresnoga djelovanja mogu se odrediti za opterećenje prouzročeno horizontalnom silom  $F_a$  nekonstrukcijskog elementa koja se određuje ovako:

$$F_a = (S_a W_a \gamma_a) / q_a$$

gdje je:

$F_a$  horizontalna potresna sila koja djeluje u središtu mase nekonstrukcijskog elementa u najnepovoljnijemu smjeru

$W_a$  težina elementa

$S_a$  potresni koeficijent koji se odnosi na nekonstrukcijske elemente

$\gamma_a$  faktor važnosti elementa

$q_a$  faktor ponašanja elementa.

Potresni koeficijent  $S_a$  izračunava se s pomoću formule:

$$S_a = \alpha S [ 3 (1 + z/H) / (1 + (1 - T_a/T_1)^2) - 0,5 ]$$

gdje je:

$\alpha$  omjer proračunskog ubrzanja  $a_g$  i ubrzanja sile teže  $g$

$S$  parameter tla

$T_a$  osnovni period vibracija nekonstrukcijskog elementa

$T_1$  osnovni period vibracija zgrade u mjerodavnome smjeru

$z$  visina nekonstrukcijskog elementa nad temeljem zgrade

$H$  ukupna visina zgrade.

**Tablica – Vrijednosti faktora ponašanja  $q_a$  za nekonstrukcijske elemente**

<b>Vrsta nekonstrukcijskog elementa</b>	<b><math>q_a</math></b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- konzolni parapeti i ukrasi</li> <li>- znakovi i oglasne ploče</li> <li>- dimnjaci, stupovi i spremnici na nogarima koji djeluju kao neučvršćene konzole uzduž više od polovice svoje ukupne visine</li> </ul>	1,0
<ul style="list-style-type: none"> <li>- vanjski i unutarnji zidovi</li> <li>- dimnjaci, stupovi i spremnici na nogarima koji djeluju kao neučvršćene konzole uzduž manje od polovice svoje ukupne visine ili su učvršćeni ili vezani na konstrukciju u svojem središtu mase ili iznad njega</li> <li>- usidrenja ormara ili polica s knjigama pričvršćenih na stropove</li> <li>- sidrenja ovješanih plafona i rasvjete</li> </ul>	2,0

## **Razredi važnosti i faktori važnosti**

**Zgrade se općenito razvrstavaju u četiri razreda važnosti što ovisi o veličini zgrade, njezinoj vrijednosti i važnosti za javnu sigurnost i mogućnost ljudskih gubitaka u slučaju rušenja.**

**Razredima važnosti pridijeljeni su različiti faktori važnosti  $\gamma$**

**Faktor važnosti  $\gamma = 1,0$  pridružen je proračunskomu potresu koji ima referentni povratni period**

**Definicije razreda važnosti te pridruženi faktori važnosti dani su u tablici**

**Tablica – Razredi važnosti i faktori važnosti za zgrade**

<b>Razred važnosti</b>	<b>Zgrade</b>	<b>Faktor važnosti <math>\gamma</math></b>
IV	Zgrade čija je cjelovitost pri potresu životno važna za zaštitu ljudi, npr. bolnice, vatrogasne postaje, elektrane itd.	[1,4]
III	Zgrade čija je potresna otpornost važna sa stajališta posljedica vezanih za rušenje, npr. škole, dvorane za skupove, kulturne institucije itd.	[1,2]
II	obične zgrade koje ne pripadaju drugim kategorijama	[1,0]
I	Zgrade manje važnosti za javnu sigurnost, npr. poljoprivredne zgrade itd.	[0,8]

## Provjera sigurnosti

Za provjeru sigurnosti moraju se uzeti u obzir odgovarajuća granična stanja.

Za zgrade razreda važnosti od **I. do III.** propisane provjere mogu se smatrati **zadovoljenim** ako je ispunjeno da ukupna **poprečna sila prouzročena potresnom proračunskom kombinacijom proračunana s faktorom ponašanja  $q=[1,0]$  manja je od one prouzročene drugim kombinacijama djelovanja za koje je zgrada proračunana temeljem linearnoga elastičnog proračuna.**

# Granično stanje nosivosti

## Uvjeti otpornosti

Za sve konstrukcijske elemente, uključujući spojeve i odgovarajuće nekonstrukcijske elemente mora biti zadovoljen uvjet

$$E_d \leq R_d$$

gdje je:

$$E_d = E (\sum G_{kj}, \gamma_l A_{Ed}, P_k, \sum \psi_{2i} Q_{ki})$$

proračunska vrijednost unutarnjih sila pri potresnoj proračunskoj situaciji uključujući, ako je to potrebno, učinke drugog reda

$$R_d = R (f_k / \gamma_M)$$

odgovarajuća proračunska otpornost elementa proračunana po pravilima navedenim za odgovarajuće gradivo (karakteristična čvrstoća  $f_k$  i parcijalni koeficijent sigurnosti  $\gamma_M$ ) i u skladu s mehaničkim modelima koji odgovaraju navedenoj vrsti konstrukcijskog sustava

Učinci drugog reda (učinak  $P-\Delta$ ) ne trebaju se razmatrati ako je u svim katovima ispunjeno:

$$\theta = (P_{\text{tot}} d_r) / (V_{\text{tot}} h) \leq 0,10$$

gdje je:

- $\theta$  koeficijent osjetljivosti međukatnoga pomaka
- $P_{\text{tot}}$  ukupno vertikalno opterećenje iznad promatranoga kata i u njemu, u skladu s pretpostavkama načinjenim pri proračunu potresnih unutarnjih sila
- $d_r$  proračunski međukatni pomak proračunan kao razlika prosječnih horizontalnih pomaka pri vrhu i pri podnožju kata koji se promatra
- $V_{\text{tot}}$  ukupna potresna katna poprečna sila
- $h$  katna visina.

Ako je  $0,1 < \theta \leq 0,2$ , mogu se učinci drugog reda približno uzeti u obzir povećanjem mjerodavnih potresnih unutarnjih sila s faktorom jednakim  $1/(1-\theta)$ .

Vrijednost koeficijenta  $\theta$  ne smije premašiti 0,3.

## **Uvjeti duktilnosti**

Mora se provjeriti da konstrukcijski elementi i konstrukcija kao cjelina imaju prikladnu duktilnost uzevši u obzir očekivano iskorištenje duktilnosti, koje ovisi o odabranome sustavu i faktoru ponašanja.

Moraju biti zadovoljeni posebni zahtjevi koji se odnose na gradivo uključujući, ako je to navedeno, odredbe iz proračuna prema kapacitetu nosivosti kako bi se dobio redosljed otvaranja plastičnih zglobova i povećana otpornost izvan plastičnih zglobova i u elementima bez zglobova radi izbjegavanja krhkih oblika sloma.



## Otpornost horizontalnih dijafragma (stropova)

Dijafragme i ukrućenja u horizontalnim ravninama moraju s dovoljnim povećanjem (zalihom) nosivosti moći prenijeti proračunske unutarnje sile na različite nosive sustave koji nose horizontalno opterećenje i s kojima su povezane.

Smatra se da je to zadovoljeno ako su pri odgovarajućim provjerama otpornosti sile dobivene proračunom pomnožene faktorom većim od 1,0.

- Vrijednosti koje su dodijeljene za  $\gamma_d$  smiju se ustanoviti u nacionalnom dodatku za državu. Preporučena vrijednost za krhke oblike sloma kao što je posmik u betonskoj dijafragmi je 1,3, a za duktilne oblike sloma 1,1.

## Otpornost temelja

Unutarnje sile koje djeluju na temelje moraju se odrediti na temelju proračuna po kapacitetu nosivosti uzimajući u obzir moguću povećanu nosivost, no pritom ne treba premašiti unutarnje sile koje odgovaraju odzivu konstrukcije pri potresnoj proračunskoj situaciji uz pretpostavku elastičnoga ponašanja ( $q=1,0$ ).

Ako su unutarnje sile koje djeluju na temelje određene primjenom faktora ponašanja  $q \leq [1,5]$ , ne zahtijeva se proračun prema kapacitetu nosivosti.

# Potresne razdjelnice

Pri potresu, zgrade moraju biti zaštićene od sudaranja sa susjednim građevinama.

Smatra se da je to zadovoljeno ako je **razmak od granične crte do mogućih točaka sudara veći od najvećega horizontalnog pomaka**.

Ako su katne visine zgrade koja se proračunava iste kao i katne visine susjedne zgrade, može se gore navedeni razmak smanjiti faktorom [0,7].

Razmak koji razdvaja zgrade ne zahtijeva se ako su predviđeni prikladni nosivi zidovi po opsegu zgrade koji služe kao "odbojnici". Najmanje dva takva zida moraju biti postavljena na svakoj strani izloženoj sudaranju i moraju se protezati po cijeloj visini zgrade. Oni moraju biti okomiti na stranu izloženu sudaru i mogu završavati na graničnoj crti. Tada se razmak koji razdvaja preostale dijelove od osi razdjelnice zgrada može smanjiti na [4,0] cm.

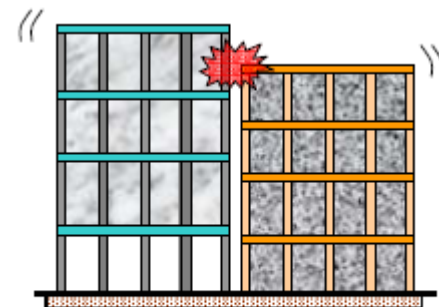
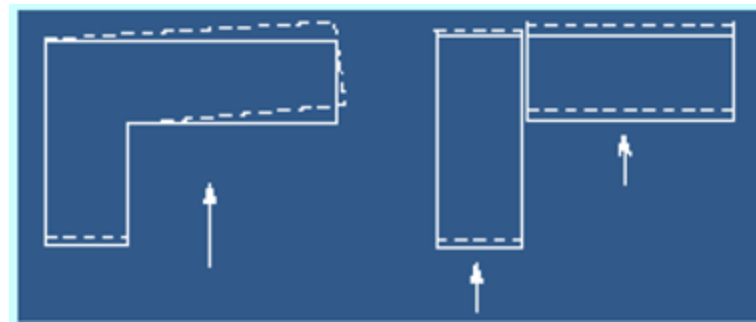


Figure 4: Pounding can occur between adjoining buildings due to horizontal vibrations of the two buildings.



# Granično stanje uporabljivosti

## Općenito

Smatra se da je zahtjev za ograničenim oštećenjem (granično stanje uporabljivosti) zadovoljen ako su međukatni pomaci ograničeni pri potresnom djelovanju koje ima veću vjerojatnost pojave od proračunskoga potresnog djelovanja.

Za zgrade važne za zaštitu stanovništva ili za zgrade koje sadrže osjetljivu opremu mogu se zahtijevati dodatne provjere graničnog stanja uporabljivosti.

## Ograničenje međukatnoga pomaka

Treba se pridržavati ovih ograničenja:

a) za zgrade koje imaju za konstrukciju pričvršćene nekonstrukcijske elemente od krhkih gradiva:

$$d_r / v \leq [0,005] h$$

b) za zgrade koje imaju duktilne nekonstrukcijske elemente

$$d_r / v \leq [0,0075] h$$

c) za zgrade koje imaju nekonstrukcijske elemente pričvršćene tako da na njih deformacije konstrukcije ne utječu:

$$d_r / v \leq [0,010] h$$

gdje je:

$d_r$  proračunski međukatni pomak

$h$  katna visina

$v$  faktor smanjenja kojim se uzima u obzir manji povratni period potresa koji je u vezi s graničnim stanjem uporabljivosti.

Faktor smanjenja može ovisiti i o razredu važnosti zgrade. Vrijednosti  $v$  dane su u tablici

Tablica – Vrijednosti faktora smanjenja  $v$

Razred važnosti	I	II	III	IV
Faktor smanjenja $v$	[0,5]	[0,5]	[0,4]	[0,4]

# Približni proračun torzijskih učinaka

## Općenito

Za zgrade koje ne zadovoljavaju kriterije pravilnosti u tlocrtu, ali ispunjavaju jedan od skupine uvjeta danih kao slijedeći kriteriji može se primijeniti približni proračun torzijskih učinaka.

## Kriterij 1

Zgrada ima dobro raspodijeljene i relativno krute pregradne zidove.

Visina zgrade ne premašuje [10] m.

Omjer visina / duljina zgrade u oba glavna smjera ne premašuje [0,4].

## **Kriterij 2**

**Krutost stropova u vlastitoj ravnini dosta je velika u usporedbi s horizontalnom krutošću vertikalnih konstrukcijskih elemenata, tako da se može pretpostaviti kruta stropna dijafragma.**

**Središta horizontalne krutosti i središta masa nalaze se približno na vertikalnoj crti. Ovaj je uvjet postignut ako su zadovoljeni ovi uvjeti:**

- a) Svi sustavi koji preuzimaju horizontalno opterećenje kao što su jezgre, nosivi zidovi ili okviri neprekinuti su od temelja do vrha zgrade.**
- b) Deformirani oblici pojedinih sustava ne razlikuju se previše pri horizontalnom opterećenju. (Taj uvjet može biti zadovoljen kod čistih okvirnih i zidnih sustava; općenito nije zadovoljen kod mješovitih okvirno-zidnih sustava.)**

**Ako su zadovoljeni uvjeti a) i b) može se proračunati zajednički položaj središta krutosti svih katova kao središte sustava sila koje su raspoređene i prouzrokuju jedinični pomak na vrhu pojedinog sustava za prijenos horizontalnih sila.**

**U slučaju vitkih zidova kod kojih prevladavaju deformacije od savijanja te veličine mogu biti momenti tromosti presjeka zidova. Ako su uz deformacije prouzročene savijanjem mjerodavne i posmične deformacije, to se može uzeti u obzir istovrijednim momentima tromosti presjeka.**

## Približni proračun

Proračun se može provesti za dva ravninska modela, po jedan model za svaki glavni smjer.

Odrede se horizontalne sile  $F_i$

Horizontalna sila  $F_i$  u katu "i" pomaknuta je za promatrani smjer potresnoga djelovanja iz svoga početnog položaja u odnosu na središte mase  $M$  za dodatnu ekscentričnost  $e_2$ , koja se može približno izračunati kao manja od ovih dviju vrijednosti:

$$e_2 = 0,1 (L + B) \sqrt{10e_0 / L} \leq 0,1 (L + B)$$

i

$$e_2 = (1 / 2e_0) [\ell_s^2 - e_0^2 - r^2 + \sqrt{(\ell_s^2 + e_0^2 - r^2)^2 + 4e_0^2 r^2}]$$

gdje je:

$e_2$  dodatna ekscentričnost kojom se uzima u obzir dinamički učinak istodobnih poprečnih i torzijskih vibracija,

$e_0$  stvarna ekscentričnost između središta krutosti  $S$  i početnog središta mase  $M$  (vidi sliku A.1)

$\ell_s^2 = (L^2 + B^2)/12$  (kvadrat "polumjera tromosti")

$r^2$  omjer katne torzijske i horizontalne krutosti (kvadrat "polumjera torzije").



Dodatna se ekscentričnost  $e_2$  može zanemariti ako omjer  $r^2$  katne torzijske i horizontalne krutosti premašuje vrijednost  $5 (\ell_s^2 + e_0^2)$ .

Torzijski se učinci mogu odrediti kao obvojnica učinaka koji nastaju iz proračuna dvaju statičkih opterećenja koja se sastoje od torzijskih momenata  $M_i$  zbog dviju ekscentričnosti:

$$M_i = F_i e_{\max} = F_i (e_0 + e_1 + e_2)$$

I

$$M_i = F_i e_{\min} = F_i (e_0 - e_1)$$

gdje je:

$e_1$  slučajna ekscentričnost katne mase