
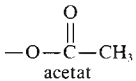
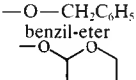
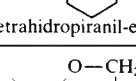

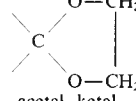
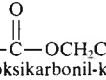
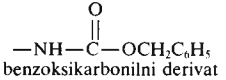
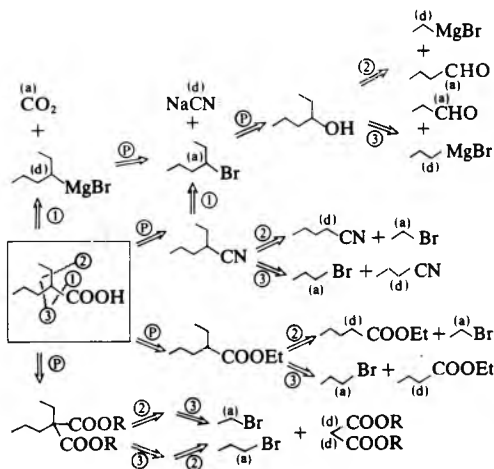


Tablica 5
 KARAKTERISTIČNE METODE ZA ZAŠTITU NAJVAŽNIJIH FUNKCIONALNIH SKUPINA

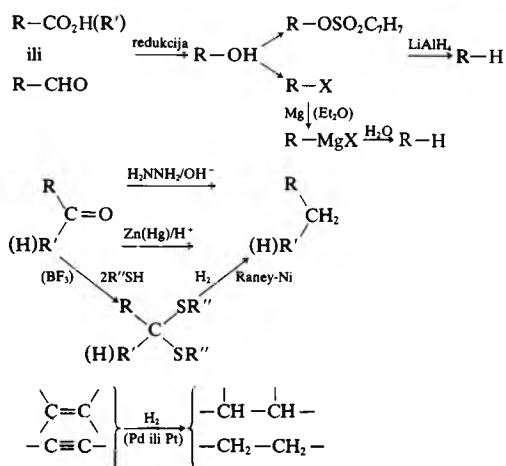
Skupina koja se zaštićuje	Reaktant za stvaranje zaštite	Zaštićena skupina	Reaktant za uklanjanje zaštite
—O—H (alkoholi)	(CH ₃ CO) ₂ O acetanhidrid (u piridinu) Cl—CH ₂ C ₆ H ₅ benzil-klorid (u KOH)  dihidropiran	 acetat  benzil-eter  2-tetrahidropiranil-eter	NaOCH ₃ , K ₂ CO ₃ ili NH ₃ u metanolu H ₂ /Pd CH ₃ COOH HCl
 (aldehidi, ketoni)	HOCH ₂ CH ₂ OH glikol	 acetal, ketal	H ₃ O ⁺
—COOH (karboksilne kiseline)	HOR alkohol	—COOR ester	OH ⁻ , H ₂ O
—NH ₂ (amini)	 benzoksikarbonil-klorid	 benzoksikarbonilni derivat	HBr/CH ₃ COOH H ₂ /Pd

Materials. Verlag Chemie, Weinheim-Deerfield Beach-Basel 1984. – W. Carruthers, Some Modern Methods of Organic Synthesis. Cambridge University Press, Cambridge-London-New York-Melbourne 1986.

A. Deljac

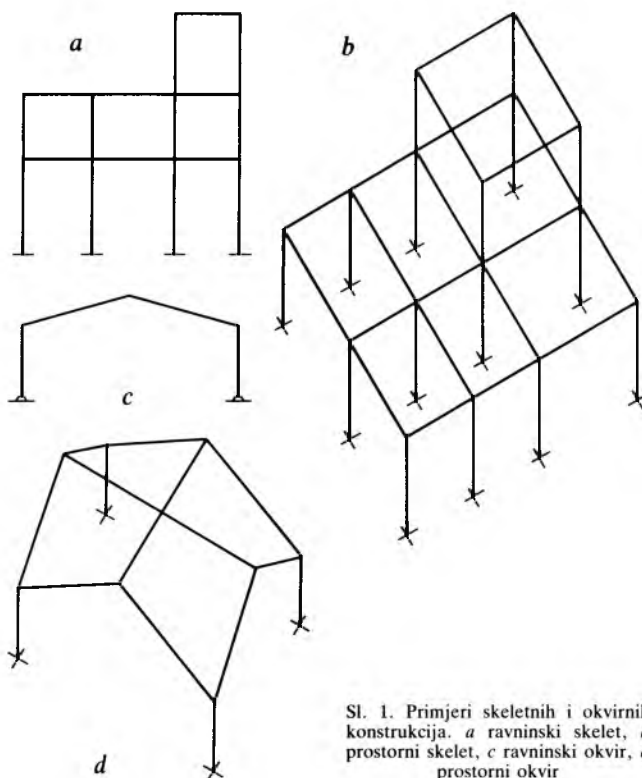


Sl. 1. Planiranje sinteze 2-etilpentan-kiseline. 1, 2, 3 konstrukcijske reakcije, P reakcije preinake funkcionalnih skupina, (a) elektrofilni sinton, (d) nukleofilni sinton



Sl. 2. Uobičajeni redukcijски postupci za uklanjanje važnijih funkcionalnih skupina

SKELETNE KONSTRUKCIJE, višepoljne i višekratne nosive konstrukcije od vertikalnih štapova (stupova) i horizontalnih štapova (greda ili prečaka). Da bi konstrukcija bila stabilna, neki od čvorova moraju biti kruti, a ostali mogu biti i zglobovi. U krutim čvorovima štapovi su tako međusobno spojeni da se ne mogu zakrenuti jedan s obzirom na drugi.



Sl. 1. Primjeri skeletnih i okvirnih konstrukcija. a ravninski skelet, b prostorni skelet, c ravninski okvir, d prostorni okvir

LIT.: R. E. Ireland, Organic Synthesis. Prentice Hall, Englewood Cliffs 1969. – R. O. C. Norman, Principles of Organic Synthesis. Chapman and Hall, London 1978. – Ž. Čeković, Principi organske sinteze. Naučna knjiga, Beograd 1982. – J. Fuhrhop, G. Penzlin, Organic Synthesis, Concepts, Methods, Starting

Skelet je ravninski kad su osi svih štapova u jednoj ravnini (sl. 1a), a kad su osi štapova u više ravnina, skelet je prostorni (sl. 1b). Prostorni skeleti sastavljeni su od dvaju ili više serija ravninskih skeleta koji se sijeku. Pravokutnici su geometrijske jedinice ravninskih, a paralelepipedi prostornih skeleta. Ravninski skeleti mogu preuzeti opterećenja u svojoj ravnini, a prostorni skeleti u bilo kojem smjeru.

Skeleti su posebne okvirne konstrukcije (okviri). I okviri mogu biti ravninski (sl. 1c) i prostorni (sl. 1d). Geometrijske jedinice okvira ne moraju biti pravokutnici, odnosno paralelepipedi, a broj geometrijskih jedinica može biti malen.

U rešetkastim konstrukcijama (rešetkama), za razliku od okvirnih konstrukcija svi su čvorovi zglobni ili se pretpostavlja da su zglobni, a konstrukcija je ipak stabilna. Trokuti su najčešće geometrijske jedinice ravninskih rešetaka, a složeniji poliedri prostornih rešetaka. Dok su štapovi okvira napregnuti pretežno na savijanje, štapovi su rešetaka napregnuti pretežno aksijalno. Zbog toga su rešetke statički povoljnije od okvira, ali okviri imaju funkcionalne, estetske i izvedbene prednosti.

Skeleti se vrlo često upotrebljavaju u zgradarstvu. Široka upotreba skeleta nije uvjetovana njihovom statičkom vrijednošću i ekonomičnošću, jer neke druge konstrukcije, npr. lukovi (v. *Lukovi*, TE 7, str. 564) i ljske (v. *Ljske*, TE 7, str. 623), omogućuju bolje iskorištenje materijala i premošćivanje većih raspona. Ravni stropovi, koji se pogotovo u višekaticama ne mogu izbjeći, traže upotrebu skeletnih konstrukcija. Ponekad takvi stropovi nemaju grede kao posebnih konstrukcijskih elemenata, ali njihovu funkciju preuzima stropna ploča.

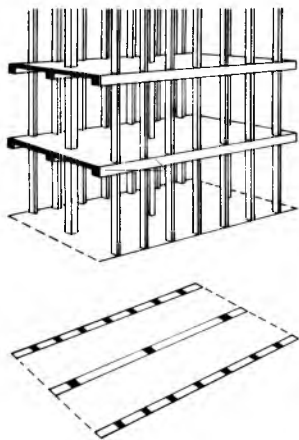
Skeletni se sustav upotrebljava kad je potrebna fleksibilnost u iskorištenju prostora i raznolikost (uredske zgrade, škole, zdravstvene ustanove) ili kad su potrebni veći nepregrađeni prostori (robne kuće, biblioteke, banke).

Skeleti se najčešće grade od armiranog betona ili čelika.

Skelet je samonosiva konstrukcija, dok se za ostale funkcije (pregrađivanje, zatvaranje prostora, zaštita od vanjskih utjecaja i buke) upotrebljavaju posebni, obično lagani, nenosivi elementi. Zbog toga ukupna masa građevina nije velika, što omogućuje primjenu skeletnih konstrukcija i za vrlo visoke građevine.

OBLIKOVANJE SKELETNIH KONSTRUKCIJA

Skelet je definiran rasterom, tj. rasporedom njegovih horizontalnih i vertikalnih elemenata. Prema međusobnom razmaku stupova u fasadi razlikuju se skeleti uskog i skeleti širokog rastera.



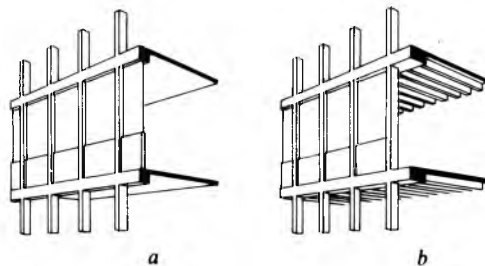
Sl. 2. Skelet uskog rastera

Skeleti uskog rastera. To su skeleti u kojima se raster konstrukcije podudara s rasterom podjele prostora (sl. 2). Tada međusobni razmak stupova u pročelju iznosi $0,9 \cdot \dots \cdot 3,5$ m, a najčešće $1,8 \cdot \dots \cdot 1,9$ m. Takav raster odgovara funkcionalnim zahtjevima (oprema prostorija, dimenzije namještaja). Uski raster omogućuje lako pregrađivanje prostora, stvaranje užih i širih prostorija, pa je fleksibilniji od skeleta širokog rastera. Stupovi mogu biti vrlo vitki, jer ih ima mnogo u fasadi, pa

su njihove osne sile male. Širina stupova u fasadi obično nije veća od 20 cm, čak ni u višim zgradama. Ako se upotrijebe prefabricirani stupovi, njihove dimenzije mogu biti i manje.

Strop se može izvesti kao jednosmjerna ploča koja nosi paralelno s pročeljem. Tada su poprečne grede na koje se oslanja ploča vrlo malo razmaknute. Rasponi su ploča tako mali da je ploča statički neiskorištena i cijeli je sustav neekonomičan. Stropna ploča, naime, da bi se ostvarila zvučna izolacija, ne bi trebala biti tanja od 15 cm, odnosno od 12 cm kad se izvodi plivajući pod.

Povoljnija je jednosmjerna ploča okomita na pročelje. Ona je masivna (sl. 3a) kad su rasponi manji od ~ 5 m, a rebrasta (sl. 3b) kad se radi o većim rasponima. Ploča se u pročelju oslanja na rubnu gredu, koja ujedno prihvaća lokalno opterećenje fasade. Budući da su rasponi rubne grede mali, ona može biti niska, a kad je stropna ploča rebrasta, obično je dovoljno da visina rubne grede bude jednaka visini rebara.

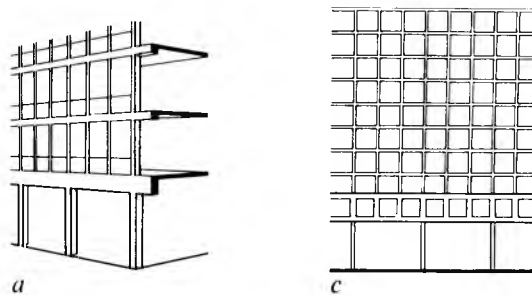


Sl. 3. Skelet uskog rastera: a s masivnom, b s rebrastom jednosmjernom pločom okomitom na pročelje

Stupovi i grede na pročelju čine uske i visoke pravokutnike.

Da bi se spriječilo prekomjerno provođenje topline, znojenje i dodatno naprezanje konstrukcije, treba pobočke stupova koje su izložene vanjskim utjecajima toplinski izolirati. S toga je stajališta najpovoljnije i rubne i uglovne stupove smjestiti unutar plašta zgrade. Ako su tri pobočke stupova izvan plašta zgrade, oni zbog oblaganja bočnih pobočki postaju prividno širi, pa se smanjuje dnevna rasvjeta prostorija.

Prizemlje često služi drugoj svrsi nego gornje etaže. Ako se žele ostvariti veliki ulazni prostori, velika reprezentativna

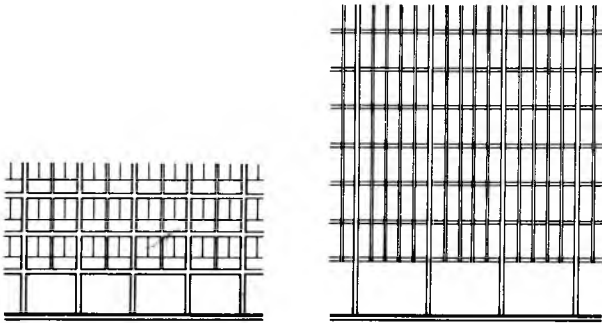


Sl. 4. Prihvatni nosači: a u obliku podvlake, b u obliku nadvlake, c u obliku okvirnog nosača

predvorja, šire otvaranje prema ulici radi komunikacije s prolaznicima, ne dolazi u obzir mali razmak stupova u prizemlju. Tada neki stupovi gornjih etaža moraju završiti iznad prizemlja, a njihove akcije treba prihvatiti nosačem na koti stropa prizemlja i prenijeti ih na one stupove koji prolaze i kroz prizemlje. Prihvatni nosač može biti podvlaka (sl. 4a), nadvlaka (sl. 4b), okvirni nosač (sl. 4c), rešetka i sl.

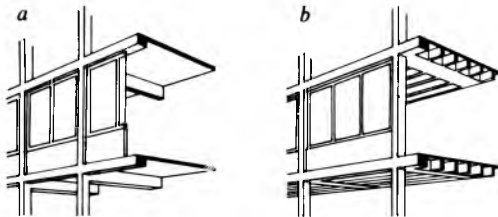
Kako su raspon i opterećenje prihvatnog nosača bitno veći od raspona i opterećenja greda u gornjim etažama, i visina prihvatnog nosača mora biti bitno veća, pa se često proteže kroz cijelu etažu (sl. 4c). Svršishodno je prihvatni nosač iskoristiti i kao element arhitektonske kompozicije, a neprihvatljivo je da se prihvatni nosač kaširanjem izjednači s nosivim elementima koji imaju drukčiju funkciju.

Skeleti širokog rastera. Kad skelet ima širok raster, konstrukcija pročelja ima raster koji je višekratnik rastera podjele prostora. Razmak stupova u pročelju veći je od 3,5 m. Presjek je tih stupova veći, jer je i opterećenje veće, nego presjek stupova kad skelet ima uzak raster. Raster stupova i greda u fasadi čini niske i široke pravokutnike. Kako se polja između stupova ne mogu zatvoriti jednim prozorom, široki se raster prepoznaje po tome što su ta polja podijeljena nenosivim stupovima na dva ili više prozora (sl. 5). Nenosivi stupovi služe za priključak pregradnih zidova okomitih na fasadu, kao instalacijske vertikale ili za učvršćenje prozora. Nenosivi stupovi trebaju biti uži od nosivih.



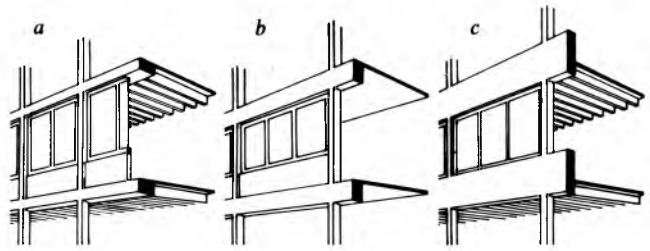
Sl. 5. Primjeri skeleta širokog rastera

Stropna konstrukcija može biti masivna jednosmjerna ploča paralelna s fasadom (sl. 6a). Budući da su njeni rasponi sada veći, ona je statički iskorištena. Rubna greda ukrucuje ploču i nosi linijsko opterećenje konstrukcije fasade. Primijeni li se rebrasta jednosmjerna ploča paralelna s fasadom (sl. 6b), poželjno je, iz estetskih i izvedbenih razloga, da poprečne grede budu toliko visoke koliko i rebra.



Sl. 6. Skeleti širokog rastera: a s masivnom, b s rebrastom jednosmjernom pločom paralelnom s pročeljem

Jednosmjerna ploča, masivna ili rebrasta, može biti orijentirana i okomito na fasadu. Ako je rebrasta, a raspon rubne grede, tj. razmak stupova, nije veći od $\sim 2/3$ raspona ploče, može se dobiti ravan pogled (sl. 7a). Ako je, međutim, raspon rubne grede veći od $\sim 2/3$ raspona ploče, rubna greda mora biti relativno visoka. Izvede li se rubna greda kao podvlaka (sl. 7b) smanjuje se dovod dnevnog svjetla koje ulazi neposredno ispod stropa i koje daje najravnomjerniju rasvjetu u prostoriji. S toga stajališta povoljnije su nadvlake (sl. 7c) jer iskorištavaju visinu parapeta. Tada treba pažljivo betonirati, zbog radne reške na koti gornje plohe ploče, da ne bi nastala betonska gnijezda, što je estetski neprihvatljivo.

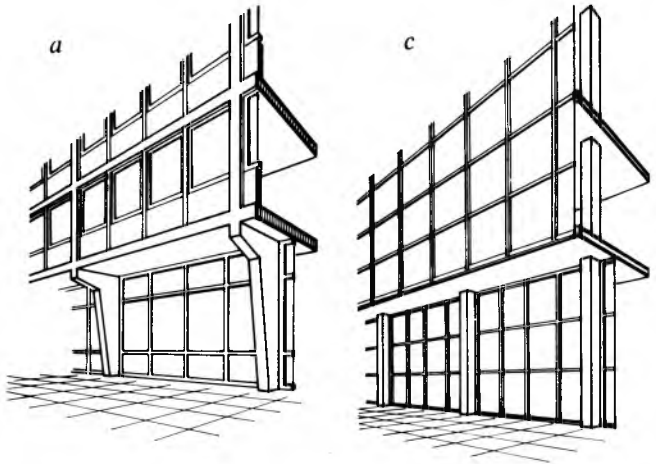


Sl. 7. Skeleti širokog rastera s jednosmjernom pločom okomitom na pročelje. a s ravnim pogledom, b s podvlakom, c s nadvlakom

Ta se neugodnost ne pojavljuje ako se nadvlake ožbukaju ili oblože.

Ako se u zgradama sa širokim rasterom želi dobiti slobodno prizemlje, ne pojavljuju se nikakve konstrukcijske poteškoće. Najdonja rubna greda, naime, ima jednaku funkciju kao sve ostale i preuzima jednako opterećenje pa ima i jednake dimenzije (sl. 5).

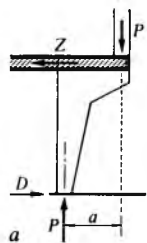
Uvučeno prizemlje. Prizemlje, kao kontaktna zona zgrade s ulicom, ima drukčije značenje u strukturi zgrade od ostalih etaža. Ta se razlika često želi oblikovno naglasiti, pa se izvodi uvučeno prizemlje.



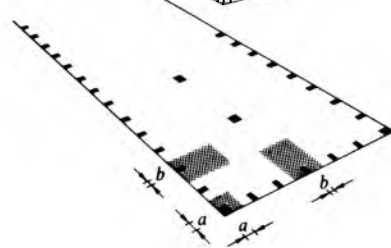
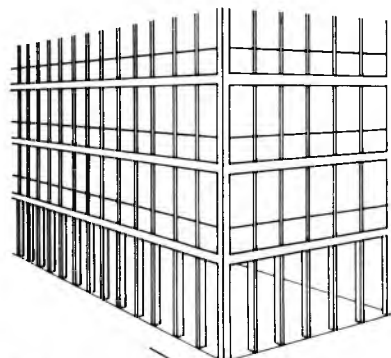
Sl. 8. Uvučeno prizemlje: a s uvučenim stupovima, b s kontinuiranim stupovima slobodnim u prostoru, c s prepuštenim stropovima i pomaknutom opnom zgrade, d s pomaknutom opnom zgrade

Ako su stupovi u prizemlju uvučeni (sl. 8a), na mjestu se diskontinuiteta pojavljuje koncentracija naprezanja, što je posebno nepovoljno kad se pojave dinamička opterećenja. Analiza ravnoteže stupa prizemlja (sl. 9a) pokazuje da je moment Pa kojega čine vertikalna akcija i vertikalna reakcija u ravnoteži s momentom para horizontalnih sila Z i D . Glava se stupa mora, dakle, preko stropa prizemlja horizontalno usidriti; sila Z prenosi se u neki zid (sl. 9b) ili neki drugi vertikalni ukrutni element, naprežući na vlak strop prizemlja.

Uvučeno prizemlje može se ostvariti i bez uvlačenja stupova na jedan od sljedeća tri načina: *a*) fasada se u prizemlju uvuče, a slobodni stupovi prolaze do temelja tvoreći kolonadu (sl. 8b). Takvo je uvučeno prizemlje prikladno za zgrade u gradskim središtima, jer tada ulica ili trg dobivaju trijem; *b*) kad zgrada ima konzolno istaknute stropove u jednom ili u oba smjera, uvučeno se prizemlje ostvaruje premještanjem ravnine pročelja, tako da se prizemlje zatvori u ravnini unutrašnjih pobočki stupova (sl. 8c); *c*) ako je dimenzija presjeka stupova koja je okomita na pročelje dosta velika (visoke zgrade), uvučeno se prizemlje može ostvariti pomakom opne prizemlja (sl. 8d) iako stropovi nemaju prepuste.

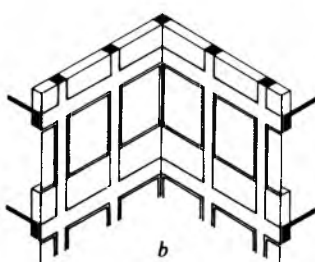
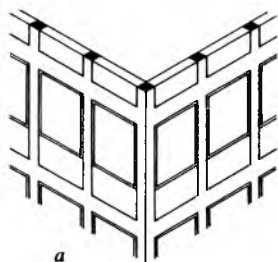


Sl. 9. Ravnoteža stupa prizemlja (*a*) i primjena zida za horizontalno pridržavanje glave stupa (*b*)



Sl. 10. Skelet s jednolikim rasporedom stupova u pročeljima

Uglovi. Zbog prepletanja funkcionalnih, konstrukcijskih i statičkih zahtjeva izvedba uglova zgrada često zadaje teškoće. Na prvi pogled čini se logično da se jednako tretiraju sva pročelja i da se raščlane stupovima koji su međusobno jednako udaljeni (sl. 10). Priklijuče li se prozori i parapeti na ugaone stupove pomoću jednakih detalja kao i na ostale rubne stupove, ugaoni stup mora imati istu dubinu *a* kao i ostali stupovi. Ta se dubina, međutim, pojavljuje na susjednoj fasadi kao vidljiva širina koja je veća od širine *b* ostalih stupova. Zbog toga ugaoni stup ima veći presjek (*aa*) od ostalih (*ab*). On je, međutim, prema doprinosnoj tlocrtnoj površini, manje opterećen od ostalih stupova, pa je to sa stajališta konstrukcije nelogično. To se proširenje uglovnih stupova osobito zapaža kad su fasade u ravninama vanjskih pobočaka stupova (sl. 11a). Ono je, međutim, nevidljivo kad su uglovi introvertirani (sl. 11b).

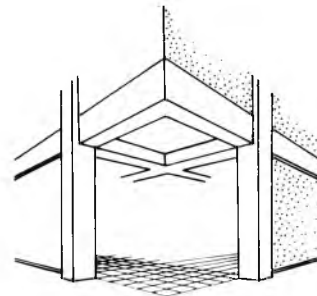


Sl. 11. Pročelje s ekstrvertiranim (*a*) i introvertiranim (*b*) uglovima zgrade

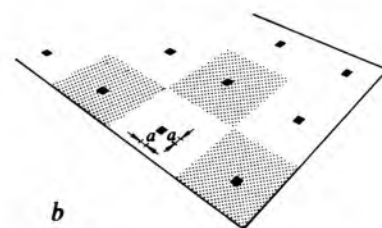
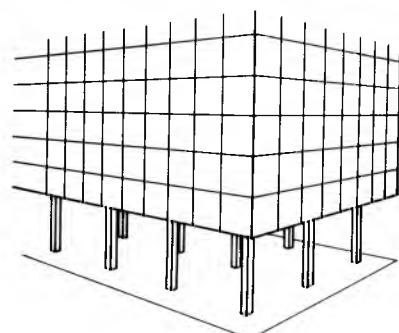
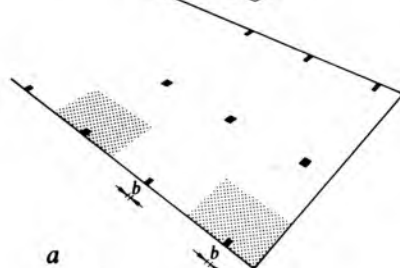
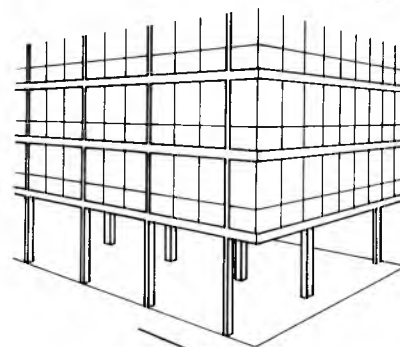
Odustane li se od uglovnog stupa, može se u uglu zgrade smjestiti ulaz (sl. 12).

Ako su stropovi prepušteni u jednom smjeru (sl. 13a), svi su stupovi podjednako opterećeni. Pročelja su različito

obrađena i raščlanjena, što razbija monotoniju i poboljšava vanjski izgled zgrade, pa se postiže povoljna raspodjela opterećenja. Prepusti su statički povoljni jer je raspodjela momenata savijanja ravnomjernija i jer se smanjuju progibi. Duljina prepusta ne bi smjela biti veća od $1/4 \dots 1/3$ susjednog raspona istog smjera.



Sl. 12. Fasada bez uglovnog stupa

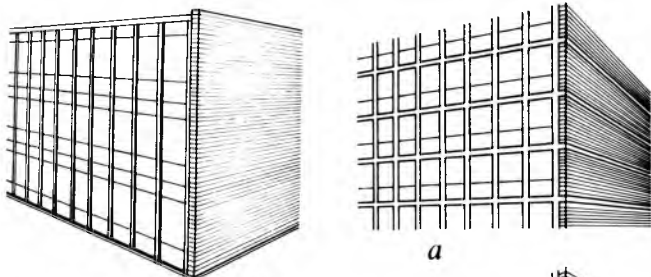


Sl. 13. Zgrada s prepuštenim stropovima u jednom smjeru (*a*) i u oba smjera (*b*)

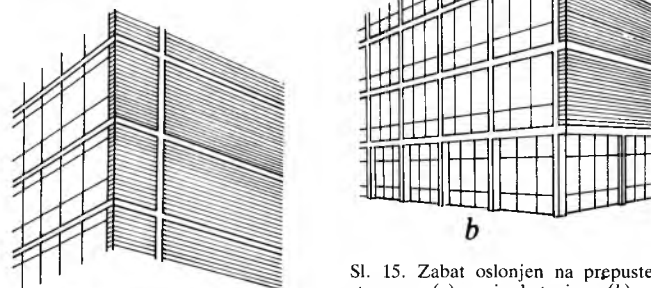
Stropovi s prepustima u oba smjera (sl. 13b) konstrukcijski su još povoljniji. Stupovi su sa svih pročelja pomaknuti u unutrašnjost zgrade, uglovi su potpuno oslobođeni, a nosiva je funkcija odvojena od funkcije zatvaranja prostora. Prostor

se zatvara pomoću zidova zavjesa ili visećih fasada, a to moraju biti što lakši pretfabricirani elementi.

Zabati često nisu elementi nosive konstrukcije već služe samo za zatvaranje prostora. Mogu se graditi od opeke i odvojiti od skeleta (sl. 14). Oni tada sami sebe nose, a u skelet su usidreni da se ne bi prevrnuli ili izbočili.



Sl. 14. Zabati odvojen od skeleta



Sl. 15. Zabati oslonjen na prepuste stropova. (a) u svim katovima, (b) sa slobodnim prizemljem

Sl. 16. Zabati u ravni glavnog okvira

Kad zgrada ima više katova, izvedba samonosivog zabata nije moguća. Tada težinu zabata nosi skelet, kat po kat, pomoću malih stropnih prepusta (sl. 15a). Tako se može lako ostvariti i uvučeno prizemlje (sl. 15b).

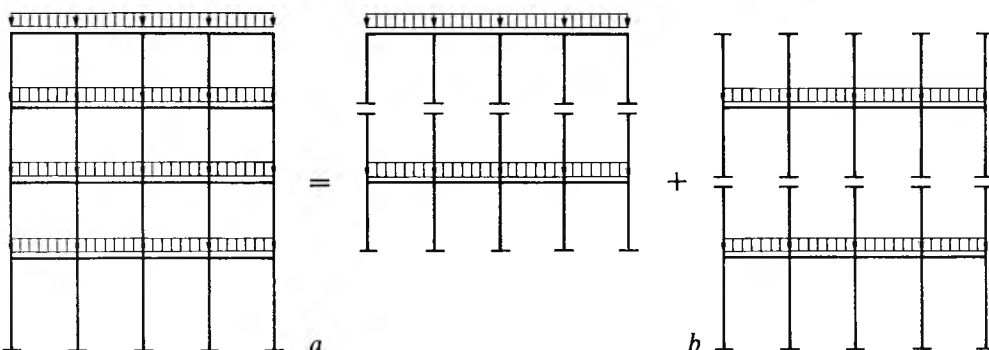
Zabati se može izvesti i u ravni rubnog okvira kao ispuna pojedinih ili svih polja (sl. 16).

Želi li se da ispuna ne sudjeluju u prijenosu horizontalnog opterećenja, moraju se fugama odvojiti od stupova i gornje prečke.

Gornji rubovi. Ploča ravnog krova skeletne konstrukcije ne razlikuje se mnogo od ostalih horizontalnih ploča. Krovna ploča može biti opterećena snijegom, ali je korisno opterećenje obično manje nego opterećenje ostalih stropnih ploča. Krov ima dodatnu funkciju toplinske izolacije, zaštite od atmosferskih utjecaja i od insolacije; ta se funkcija ostvaruje posebnim slojevima na krovnoj ploči. Kišnica se odvodi prema vertikalama u unutrašnjosti zgrade. Streha nije potrebna ni za odvod krovne vode ni za zaštitu pročelja od insolacije i kiše, jer ona ne može zaštititi cijelo pročelje višekatnice.

OSNOVNI POJMOVI MEHANIKE SKELETA

Skeleti mogu biti bočno pridržani i bočno nepridržani ili slobodni. Skeleti se bočno pridržavaju konstrukcijskim elementima, npr. zidovima i vertikalnim rešetkama, koji su



Sl. 18. Višepoljni višekatni skelet (a) i njegovi podsustavi (b) za određivanje utjecaja vertikalnog opterećenja

bočno mnogo kruti. Pridržani skeleti preuzimaju samo pripadni dio vertikalnog opterećenja, dok slobodni skeleti preuzimaju, osim pripadnog dijela vertikalnog opterećenja, i horizontalno opterećenje.

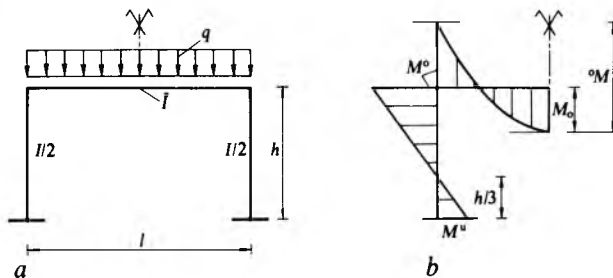
Smatra se da su svi čvorovi skeleta kruti.

Utjecaji se gravitacijskih (vertikalnih) i bočnih (horizontalnih) opterećenja razmatraju odvojeno, a onda se ukupno opterećenje slobodnih skeleta dobiva superpozicijom. Analiza se provodi za granično stanje loma uzimajući u obzir koeficijent sigurnosti. Pri određivanju krutosti presjeka štapova primjenjuju se vrijednosti koje odgovaraju tom graničnom stanju. Često se uzima da momenti inercije armiranobetonskih greda iznose 40%, a momenti inercije armiranobetonskih stupova 80% od ukupnih momenata inercije koji se dobivaju kad se uzme u obzir cijeli presjek betona zanemarujući pri tom doprinos armature.

Ako su neprihvatljive veće deformacije u upotrebnom stanju, npr. zbog osjetljivih i lakih razdjelnih zidova, mora se provjeriti i granično stanje upotrebljivosti. Tada omjer između relativnog bočnog pomaka (Δ_j) pri normativnom opterećenju i visine kata (h_j) kata j ne smije biti veći od $\sim 1/500$.

U momentnim dijagramima momenti se savijanja nanose na zategnutu stranu štapova.

Odziv na gravitacijska opterećenja. Analizira se utjecaj gravitacijskog opterećenja na portal, višepoljni višekatni skelet i prostorni skelet.



Sl. 17. Portal. a vertikalno opterećenje, b dijagram momenta savijanja

Portal. Promatra se simetričan portal, dakle okvir od dva stupa potpuno upeta u temelj i prečke, na koji djeluje jednoliko raspodijeljeno vertikalno opterećenje (sl. 17a). Parametar je unutrašnjih sila

$$\varphi = \frac{2Ih}{Il}, \tag{1}$$

gdje je I moment inercije prečke, h visina stupova, I zbroj momenata inercija obaju stupova, a l širina portala. Prosti moment prečke (sl. 17b) iznosi

$$^oM = \frac{q l^2}{8}, \tag{2}$$

gdje je q opterećenje po jedinici duljine prečke. Momenti su savijanja na gornjem kraju stupova i na krajevima prečke

$$M^o = \frac{4}{3(\varphi + 2)} ^oM, \tag{3}$$

moment savijanja na donjem kraju stupova

$$M^u = \frac{M^o}{2}, \quad (4)$$

a poljni moment savijanja prečke

$$M_o = {}^oM - M^o. \quad (5)$$

Ostale se unutrašnje sile, dakle poprečne i uzdužne sile, određuju iz uvjeta ravnoteže.

Ako portal ima potpuno krutu prečku ($\bar{I} \rightarrow \infty$ pa i $\varphi \rightarrow \infty$), što približno vrijedi kad je presjek prečke puno veći od presjeka stupova, momenti savijanja iznose

$$M^o = M^u = 0, \quad (6)$$

$$M_o = {}^oM. \quad (7)$$

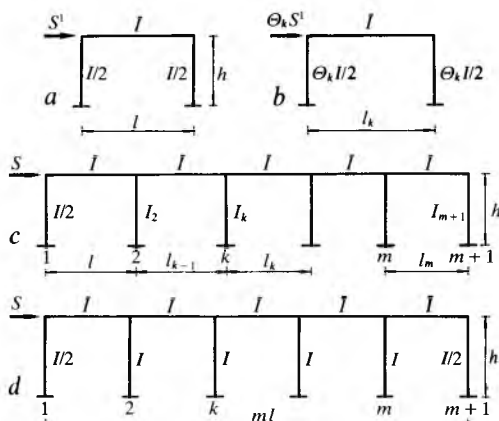
Višepoljni višekatni skeleti. Utjecaj vertikalnog opterećenja na višepoljni višekatni skelet (sl. 18a) približno se analizira tako da se skelet raščlani u više podsustava od po jedne prečke i stupova u susjednim katovima (sl. 18b). Broj podsustava jednak je broju prečaka, tj. broju katova. Unutrašnje se sile u tim podsustavima određuju metodom pomaka, metodom raspodjele momenata savijanja ili pomoću gotovih formula i tablica. Tako utvrđene unutrašnje sile prečaka smatraju se konačnim vrijednostima. Stupovi svakog kata pripadaju dvama podsustavima, pa se njihovi doprinosi superponiraju.

Prostorni skeleti. Takvi se skeleti rastavljaju u ravninske skelete, koji se analiziraju svaki za sebe neovisno o drugima na osnovi pripadnog opterećenja.

Komponiranje proporcioniranih skeleta. Analiza sličnih portala na slikama 19a i 19b pokazuje da djelovanjem horizontalnog opterećenja nastaju jednaki zakreti čvorova i jednaki bočni pomaci glava stupova ako je parametar portala Θ_k za portal k jednak

$$\Theta_k = \frac{l}{l_k}, \quad (8)$$

gdje je l širina referentnog, a l_k širina k -tog portala.



Sl. 19. Komponiranje višepoljnih jednokatnih skeleta. a referentni portal, b k -ti portal, c skelet nejednakih raspona, d skelet jednakih raspona

Ako se referentni portal (sl. 19a), kojeg je parametar portala $\Theta_1 = 1$, sastavi s još m portala (sl. 19b), dobiva se jednokatni višepoljni skelet (sl. 19c) jednakih karakteristika deformabilnosti kao referentni portal. Parametar je takvog skeleta

$$\Theta = \sum_{k=1}^m \Theta_k = l \sum_{k=1}^m \frac{1}{l_k}. \quad (9)$$

Prečke skeleta imaju u svim poljima jednake momente inercije I , što znači da sve prečke imaju jednake poprečne presjeke po cijeloj duljini. Momenti su inercije unutrašnjih stupova

$$I_k = (\Theta_{k-1} + \Theta_k) \frac{I}{2}, \quad (10)$$

a desnog krajnjeg stupa

$$I_{m+1} = \Theta_m \frac{I}{2}, \quad (11)$$

gdje je I suma momenata inercije stupova referentnog portala. Zbroj je momenata inercije svih stupova

$$J = \Theta I. \quad (12)$$

Ako je skelet sastavljen od m jednakih portala (sl. 19d), parametri portala i skeleta te momenti inercije stupova iznose

$$\Theta_k = 1 \quad \text{za } k = 1, 2, \dots, m, \quad (13)$$

$$\Theta = m, \quad (14)$$

$$I_k = I \quad \text{za } k = 2, 3, \dots, m, \quad (15)$$

$$I_{m+1} = \frac{I}{2}. \quad (16)$$

Ukupna bočna sila S skeleta iznosi ΘS^1 , gdje je S^1 bočna sila referentnog portala, pa je

$$S^1 = \frac{S}{\Theta}. \quad (17)$$

Analogno tome, polazeći od referentnog jednopoljnog višekatnog skeleta (sl. 20a), komponiraju se višepoljni višekatni skeleti (sl. 20b). Pretpostavlja se da su parametri Θ_k jednopoljnih višekatnih elemenata jednaki za sve katove. Moment inercije k -tog stupa kata j ($j = 1, 2, \dots, n$) iznosi

$$I_{j,k} = (\Theta_{k-1} + \Theta_k) \frac{I_j}{2} \quad \text{za } k = 2, 3, \dots, m, \quad (18)$$

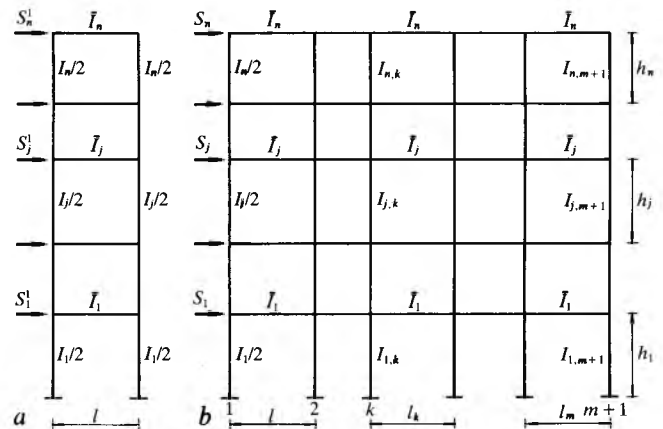
dok je moment inercije desnog krajnjeg stupa

$$I_{j,m+1} = \Theta_m \frac{I_j}{2}. \quad (19)$$

Zbroj momenata inercije svih stupova kata j iznosi

$$J_j = \Theta I_j, \quad (20)$$

gdje je Θ parametar skeleta određen izrazom (9).



Sl. 20. Komponiranje višepoljnih višekatnih skeleta. a referentni jednopoljni skelet, b višepoljni skelet

Kad se višepoljni višekatni skelet sastoji od jednakih elemenata, parametri su skeleta i momenti inercije stupova:

$$\Theta_k = 1 \quad \text{za } k = 1, 2, \dots, m, \quad (21)$$

$$\Theta = m, \quad (22)$$

$$I_{j,k} = I_j \quad \text{za } k = 2, 3, \dots, m, \quad (23)$$

$$I_{j,m+1} = \frac{I_j}{2} \quad \text{za } j = 1, 2, \dots, n. \quad (24)$$

Analogno izrazu (17), bočne su sile referentnog jednopoljnog skeleta

$$S_j^1 = \frac{S_j}{\Theta} \quad \text{za } j = 1, 2, \dots, n, \quad (25)$$

gdje su S_j ukupne bočne sile skeleta.

Opisani skeleti nazivaju se *proporcioniranima*.

RAVNINSKI SKELETI

Odziv portala na bočna opterećenja. Kad na portal sa stupovima visine h djeluje bočno opterećenje S (sl. 21a), momenti su savijanja na gornjem kraju stupova i na krajevima prečke

$$M^o = m^o \frac{hS}{2}, \quad (26)$$

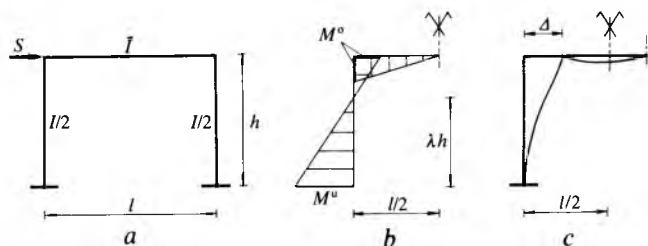
a moment savijanja na donjem kraju stupova (sl. 21b)

$$M^u = m^u \frac{hS}{2}, \quad (27)$$

gdje su

$$m^o = \frac{3\varphi}{1+6\varphi}; \quad m^u = \frac{1+3\varphi}{1+6\varphi}, \quad (28)$$

a φ parametar unutrašnjih sila (1).



Sl. 21. Horizontalno opterećen portal (a), dijagram momenta savijanja (b) i progibna linija (c)

Udaljenost se momentnih nultočaka stupova od donjeg kraja stupa dobiva kao umnožak koeficijenta

$$\lambda = \frac{1+3\varphi}{1+6\varphi}, \quad (29)$$

i visine stupa h (sl. 21b).

Bočna je krutost portala

$$K = \psi \frac{12EI}{h^3}, \quad (30)$$

gdje je

$$\psi = \frac{1+6\varphi}{4+6\varphi}, \quad (31)$$

parametar bočne krutosti portala, a E modul elastičnosti materijala. Bočni je pomak glava stupova (sl. 21c)

$$\Delta = \frac{S}{K}. \quad (32)$$

Ako portal ima potpuno krutu prečku ($\bar{I} \rightarrow \infty, \varphi \rightarrow \infty$), momenti su savijanja

$$M^o = M^u = \frac{hS}{4}, \quad (33)$$

a bočna krutost portala

$$K = \frac{12EI}{h^3}, \quad (34)$$

jer je $\psi = 1$.

Odziv višepoljnog jednokatnog skeleta. Analiza višepoljnog jednokatnog skeleta (sl. 19c) bazira se na njegovu referentnom elementu (sl. 19a). Moment je savijanja na gornjem kraju prvog stupa

$$M_1^o = m_1^o \frac{hS}{2\Theta}, \quad (35)$$

a moment savijanja na donjem kraju

$$M_1^u = m_1^u \frac{hS}{2\Theta}, \quad (36)$$

gdje je Θ parametar određen izrazom (9). Da se dobiju momenti savijanja stupa k ($k = 2, 3, \dots, m$) na gornjem (M_k^o) i

donjem kraju stupa (M_k^u), treba M_1^o i M_1^u pomnožiti zbrojem $\Theta_{k-1} + \Theta_k$, a da se dobiju momenti savijanja posljednjeg stupa (M_{m+1}^o, M_{m+1}^u), treba M_1^o i M_1^u pomnožiti s Θ_m .

Momenti su savijanja krajeva prečaka

$$\bar{M}_k = \Theta_k M_1^o \quad \text{za } k = 2, 3, \dots, m, \quad (37)$$

dok su bočne krutosti skeleta i bočni pomak glava stupova određeni izrazima (30) i (32).

Kad su prečke potpuno krute, momenti su savijanja na gornjem i donjem kraju prvog stupa

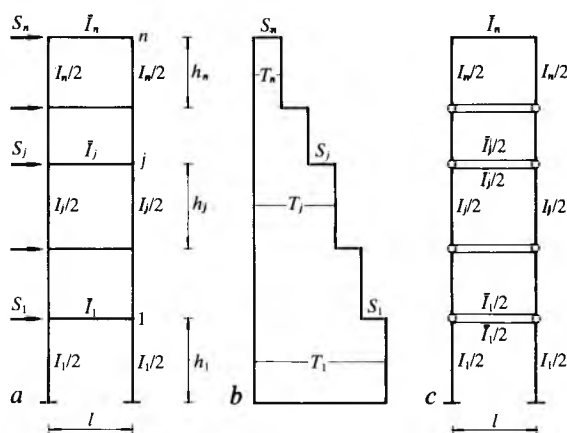
$$M_1^o = M_1^u = \frac{hS}{4\Theta}, \quad (38)$$

a bočna je krutost određena izrazom (34).

Odziv jednopoljnog višekatnog skeleta. Kad na jednopoljni višekatni skelet (sl. 22a) djeluju horizontalne sile, poprečna je sila T_j kata j jednaka zbroju svih sila iznad promatranog kata, pa je

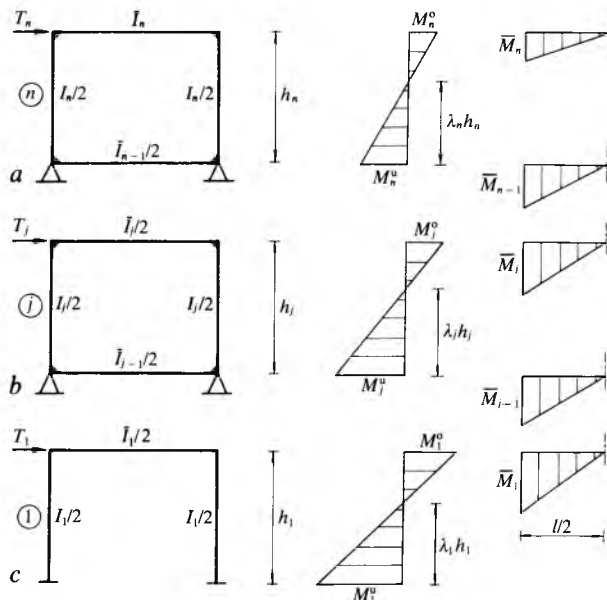
$$T_j = S_j + S_{j+1} + \dots + S_n. \quad (39)$$

Dijagram je poprečnih sila katova stepeničasta linija (sl. 22b).



Sl. 22. Horizontalno opterećen jednopoljni višekatni skelet. a horizontalno opterećenje, b dijagram poprečne sile, c skelet raščlanjen u jednokatne elemente

Prema metodi sila zadatak je n puta hiperstatičan, a prema metodi pomaka $2n$ puta hiperkinematičan. Da bi se rješavanje pojednostavnilo, skelet treba raščlaniti u jednokatne elemente koji su zgloбно spojeni (sl. 22c). Tada se sve unutrašnje prečke ($j = 2, 3, \dots, n-1$) podijele u dvije jednake prečke,



Sl. 23. Mehanička shema, dijagram momenta savijanja lijevog stupa i dijagrami momenta savijanja prečaka. a gornji, b srednji, c najdonji jednokatni element

tako da svakoj od njih pripadne polovica momenta inercije. Elementi su gornjih katova ($j = 2, 3, \dots, n$) zatvoreni pravokutnici (sl. 23a i 23b), a element je prvog kata ($j = 1$) portal (sl. 23c).

Momenti su savijanja na gornjem i donjem kraju stupova

$$M_j^o = m_j^o \frac{h_j T_j}{2} \quad \text{za } j = 1, 2, \dots, n, \quad (40)$$

$$M_j^u = m_j^u \frac{h_j T_j}{2} \quad \text{za } j = 1, 2, \dots, n, \quad (41)$$

a koeficijenti udaljenosti momentne nultočke stupova od njihova donjeg kraja

$$\lambda_j = \frac{1}{1 + m_j^o/m_j^u} \quad \text{za } j = 1, 2, \dots, n. \quad (42)$$

Koeficijenti m_j^o i m_j^u određuju se pomoću izraza

$$m_1^o = \frac{3\varphi_1}{1 + 6\varphi_1}, \quad (43)$$

$$m_j^o = \frac{\alpha_j + 3\varphi_j}{1 + \alpha_j + 6\varphi_j} \quad \text{za } j = 2, 3, \dots, n, \quad (44)$$

gdje je

$$\bar{m}_j^u = 1 - m_j^o \quad \text{za } j = 1, 2, \dots, n, \quad (45)$$

$$\varphi_j = \frac{I_j h_j}{I_l} \quad \text{za } j = 1, 2, \dots, n-1, \quad (46)$$

$$\varphi_n = 2 \frac{I_n h_n}{I_n l} \quad \text{za } j = n, \quad (47)$$

$$\alpha_j = \frac{I_j}{I_{j-1}} \quad \text{za } j = 2, 3, \dots, n-1, \quad (48)$$

$$\alpha_n = \frac{2I_n}{I_{n-1}} \quad \text{za } j = n. \quad (49)$$

Da bi se odredili momenti savijanja na krajevima prečaka skeleta (sl. 22a), potrebno je zbrojiti doprinose susjednih katova, pa se dobiva

$$\bar{M}_j = M_j^o + M_{j+1}^u \quad \text{za } j = 1, 2, \dots, n-1, \quad (50)$$

$$\bar{M}_n = \bar{M}_n^o. \quad (51)$$

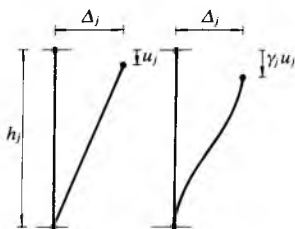
Parametri su bočne krutosti jednokatnih elemenata

$$\psi_1 = \frac{1 + 6\varphi_1}{4 + 6\varphi_1}, \quad (52)$$

$$\psi_j = \frac{(1 + \alpha_j)/2 + 3\varphi_j}{2(1 + \alpha_j) + 3\varphi_j + \alpha_j/\varphi_j} \quad \text{za } j = 2, 3, \dots, n-1. \quad (53)$$

Ako sve unutrašnje prečke imaju jednake presjeke, bočne su krutosti

$$\psi_j = \frac{1}{1 + 1/\varphi_j} \quad \text{za } j = 2, 3, \dots, n-1. \quad (54)$$



Sl. 24. Utjecaj iskrivljenja stupa na vertikalni pomak glave stupa

Prema nekim autorima poželjno je parametre bočne krutosti ψ_j reducirati faktorom $1/\gamma_j$ ($j = 1, 2, \dots, n$) kako bi se uzeo u obzir utjecaj iskrivljenja stupova na vertikalni pomak njihovih glava (sl. 24). Vrijednost γ_j ovisi o upetosti krajeva stupova, pa se uzima $\gamma_j = 1,15$ za jako upete, $\gamma_j = 1,10$ za srednje upete, a $\gamma_j = 1,05$ za neznatno upete krajeve stupova.

Bočne krutosti elemenata iznose

$$K_j = \psi_j \frac{12EI_j}{h_j^3} \quad \text{za } j = 1, 2, \dots, n, \quad (55)$$

a njihovi relativni bočni pomaci (sl. 25)

$$\Delta_j = \frac{T_j}{K_j} \quad \text{za } j = 1, 2, \dots, n. \quad (56)$$

Kad skelet ima potpuno krute prečke, momenti savijanja, koeficijenti položaja momentne nultočke stupova i bočne krutosti elemenata iznose

$$M_j^o = M_j^u = \frac{h_j T_j}{4} \quad \text{za } j = 1, 2, \dots, n, \quad (57)$$

$$\lambda_j = \frac{1}{2} \quad \text{za } j = 1, 2, \dots, n, \quad (58)$$

$$K_j = \frac{12EI_j}{h_j^3} \quad \text{za } j = 1, 2, \dots, n. \quad (59)$$

Odziv višepoljnog višekatnog skeleta. Analiza se višepoljnog višekatnog skeleta (sl. 20b) bazira na analizi njegova referentnog elementa (sl. 20a). Moment je savijanja na gornjem kraju prvog stupa kata j

$$M_{1,j}^o = m_j^o \frac{h_j T_j}{2\Theta} \quad \text{za } j = 1, 2, \dots, n, \quad (60)$$

a moment savijanja na donjem kraju

$$M_{1,j}^u = m_j^u \frac{h_j T_j}{2\Theta} \quad \text{za } j = 1, 2, \dots, n. \quad (61)$$

Momenti savijanja stupova $k = 2, 3, \dots, m$ dobivaju se množenjem tih vrijednosti sa zbrojem $\Theta_{k-1} + \Theta_k$, a momenti savijanja posljednjeg stupa $m+1$ množenjem s Θ_m .

Momenti su savijanja krajeva prečaka

$$\bar{M}_{k,j} = \Theta_k (M_{1,j}^o + M_{1,j+1}^u) \quad \text{za } k = 1, 2, \dots, m \quad \text{i} \\ j = 1, 2, \dots, n-1, \quad (62)$$

$$\bar{M}_{k,n} = \Theta_k M_{1,n}^o \quad \text{za } k = 1, 2, \dots, m. \quad (63)$$

Bočne su krutosti katova

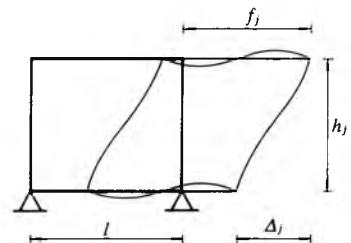
$$K_j = \psi_j \frac{12EI_j}{h_j^3} \quad \text{za } j = 1, 2, \dots, n, \quad (64)$$

a njihovi su relativni bočni pomaci određeni izrazom (56).

Efekt II. reda. Gravitacijsko opterećenje i deformacija elemenata skeleta (sl. 25) povećavaju njegove unutrašnje sile i bočne pomake zbog bočnog opterećenja. Pojavljuje se, dakle, efekt II. reda koji se naziva i $P-\Delta$ efektom. Taj je utjecaj naročito nepovoljan kad su skeleti vitki i kad skeleti bočno pridržavaju stupove koji sami za sebe nisu stabilni (pendel-stupovi, sl. 26a). Uzdužne sile katova P_j određene su kao zbroj težina katova uključujući i doprinose pendel-stupova, pa je

$$P_j = G_j + G_{j+1} + \dots + G_n \quad \text{za } j = 1, 2, \dots, n. \quad (65)$$

Dijagram je uzdužne sile stepeničasta linija (sl. 26b).



Sl. 25. Deformacija jednokatnog elementa

Da bi se odredio utjecaj efekta II. reda, potrebno je za sve katove odrediti stabilitetni indeks

$$s_j = \frac{P_j}{K_j h_j} \quad \text{za } s_j = 1, 2, \dots, n. \quad (66)$$

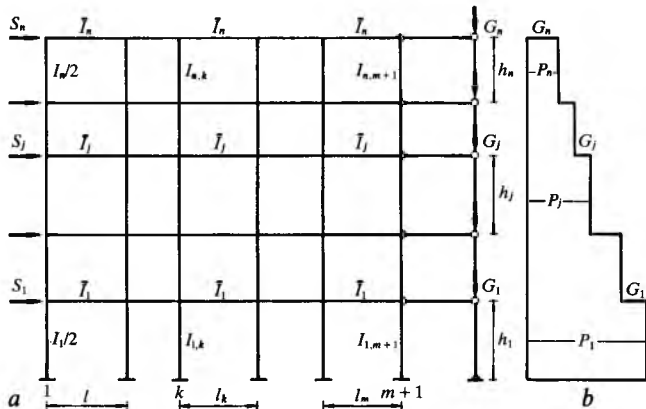
Ako je $s \leq 0,05$, efekt je II. reda neznatan, pa ga se u tom katu može zanemariti. Ako je, međutim, $s_j > 0,05$, treba efekt II. reda uzeti u obzir. Ako je $s_j \geq 0,20$, element će se previše deformirati i treba ga pojačati.

Efekt II. reda približno se uzima u obzir tako da se momente savijanja stupova i greda te bočne pomake zbog bočnog opterećenja, koji su određeni na već opisani način, (analiza I. reda) poveća množenjem s faktorom

$$\delta_j = \frac{1}{1 - s_j} \quad (67)$$

Takav se postupak može obrazložiti sljedećim razmatranjem. Moment kata, koji je zbroj momenata savijanja na gornjim i donjim krajevima svih stupova zbog bočnog opterećenja, iznosi $T_j h_j$. Zbog efekta II. reda povećava se moment kata za $P_j \Delta_j$. Povećanje momenta kata, pa zbog toga i momenata savijanja, poprečne sile i bočnog pomaka, iznosi $(T_j h_j + P_j \Delta_j) / (T_j h_j) = 1 + s_j$. Budući da je $s_j \ll 1$, to je povećanje praktički jednako povećanju koje se dobiva faktorom δ_j (67).

Eventualne nepreciznosti u izvedbi skeleta, npr. odstupanje osi stupova od vertikale, može se uzeti u obzir tako da se bočnim pomacima, izrazi (32) i (56), pribroji doprinos zakošenja stupova i tako dobivena vrijednost pomnoži s δ_j (67).



Sl. 26. Višepoljni višekatni skelet s priključenim pendel-stupovima (a) i dijagram uzdužne sile (b)

Općenita formulacija jednadžbi ravnoteže. Matrica je bočne krutosti višekatnog skeleta trobojasa dijagonalna simetrična matrica n -tog reda. Tako, npr., za $n = 5$ ona ima oblik

$$[K]_5 = \begin{bmatrix} K_{1,1} & K_{1,2} & & & \\ K_{2,1} & K_{2,2} & K_{2,3} & & \\ & K_{3,2} & K_{3,3} & K_{3,4} & \\ & & K_{4,3} & K_{4,4} & K_{4,5} \\ & & & K_{5,4} & K_{5,5} \end{bmatrix} \quad (68)$$

Članovi su matrice

$$K_{j,j} = K_j + K_{j+1} \quad \text{za } j = 1, 2, \dots, n-1, \quad (69)$$

$$K_{n,n} = K_n \quad (70)$$

$$K_{j-1,j} = K_{j,j-1} = -K_j \quad \text{za } j = 2, \dots, n. \quad (71)$$

Ako su krutosti svih katova jednake ($K_1 = K_2 = \dots = K_n = K$), matrica bočne krutosti ima oblik

$$[K]_5 = K \begin{bmatrix} 2 & -1 & & & \\ -1 & 2 & -1 & & \\ & -1 & 2 & -1 & \\ & & -1 & 2 & -1 \\ & & & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (72)$$

Jednadžba je ravnoteže

$$[K]_n \{f\}_n = \{S\}_n \quad (73)$$

gdje su f bočni progibi. Ona se sastoji od n neovisnih jednadžbi (56)

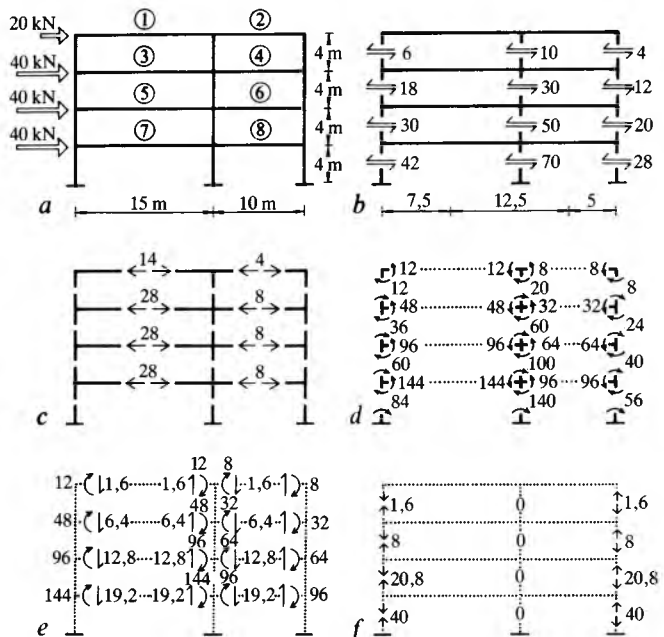
$$K_j \Delta_j = T_j \quad (74)$$

što je uvjetovano oblikom matrice $[K]$.

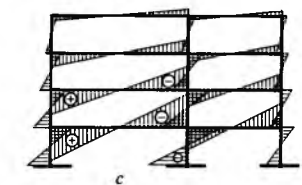
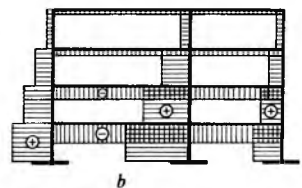
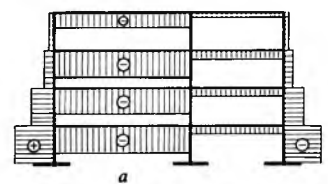
Portalna metoda analize ravninskih skeleta može se iskoristiti u preliminarnom projektiranju. Tom se metodom uz vrlo pojednostavnjene pretpostavke, iskorištavajući samo jednadžbe ravnoteže, postiže statička određenost. Te su pretpostavke: a) poprečne se sile katova dijele na stupove proporcionalno doprinosnim širinama skeleta i b) momentne su nultočke stupova i prečaka u polovici njihovih visina, odnosno raspona, pa se pretpostavlja da na tim mjestima postoje zglobovi.

Primjena portalne metode pokazat će se na tri primjera:

Primjer 1. Na dvopoljan četverokatan skelet djeluje horizontalno opterećenje (sl. 27a). Granice su doprinosnih širina u simetralama polja, pa na lijeve, srednje i desne stupove otpadaju doprinosne širine 7,5, 12,5 i 5,0 m. Poprečne sile katova dijele se za stupove u omjerima 7,5 : 12,5 : 5,0 (sl. 27b). Uzdužne sile prečki utvrđuju se na temelju ravnoteže odsječka skeleta omeđenih zglobovima (sl. 27c). Na temelju ravnoteže čvorova određuju se momenti savijanja na krajevima prečaka (sl. 27d), a onda, na temelju ravnoteže prečaka, njihove poprečne sile (sl. 27e). Uzdužne sile stupova rezultiraju iz poprečnih sila greda (sl. 27f). Dijagram uzdužne sile (sl. 28a) pokazuje da je stup na opterećenoj strani skeleta pritisnut, stup na suprotnoj strani zategnut, dok je srednji stup nenapregnut. Dijagrami poprečne sile (sl. 28b) i momenta savijanja (sl. 28c) pokazuju da je među stupovima najviše napregnut srednji stup u najnižem katu, a među prečkama najniža prečka.



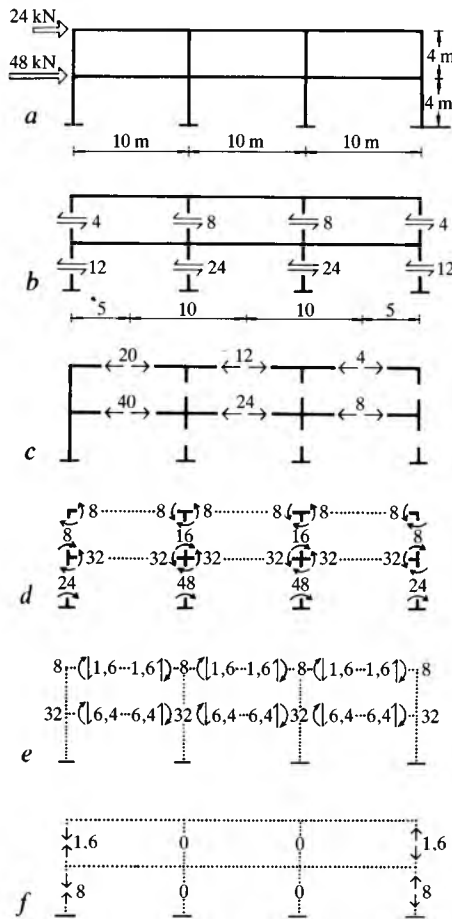
Sl. 27. Dvopoljni četverokatan skelet. a horizontalno opterećenje, b poprečne sile stupova (kN), c uzdužne sile prečaka (kN), d momenti koji djeluju na čvorove (kNm), e momenti savijanja (kNm) i poprečne sile (kN) na krajevima prečaka, f uzdužne sile stupova (kN)



Sl. 28. Dvopoljni četverokatan skelet sa slike 27. a dijagrami uzdužne sile, b poprečne sile, c momenta savijanja

Primjer 2. U troljnom dvokatnom skeletu s jednakim širinama polja (sl. 29a) poprečne se sile katova dijele na stupove u omjeru 1:2:2:1 (sl. 29b). Tipično je da se na koti donjeg kraja stupova manji dio momenta prevrtanja prenosi momentima savijanja, a veći dio parom uzdužnih sila u vanjskim stupovima. Tako, zbroj momenata savijanja iznosi $3 \cdot 48 = 144 \text{ kNm}$, moment para uzdužnih sila u vanjskim stupovima $8 \cdot 30 = 240 \text{ kNm}$, a moment prevrtanja $24 \cdot 8 + 48 \cdot 4 = 384 \text{ kNm}$.

Primjer 3. Analogno se analiziraju skeleti koji u pojedinim poljima imaju različit broj katova (sl. 30).



Sl. 29. Troljni dvokatni skelet jednakih raspona. a horizontalno opterećenje, b poprečne sile stupova (kN), c uzdužne sile prečaka (kN), d momenti koji djeluju na čvorove (kNm), e momenti savijanja (kNm) i poprečne sile (kN) na krajevima prečaka, f uzdužne sile stupova (kN)

Stabilnost ravnoteže ravninskog skeleta na koji djeluje gravitacijsko opterećenje provjerava se sljedećim postupkom.

Bočna je krutost K_j^{II} kata j uzimajući u obzir efekt II. reda manja od bočne krutosti K_j kad se ne računa s tim efektom za P_j/h_j , pa je

$$K_j^{II} = K_j - \frac{P_j}{h_j} \quad \text{za } j = 1, 2, \dots, n. \quad (75)$$

Vrijednost $P_{j,kr}$ uzdužne sile P_j koja se dobiva kad je $K_j^{II} = 0$ iznosi

$$P_{j,kr} = K_j h_j \quad \text{za } j = 1, 2, \dots, n. \quad (76)$$

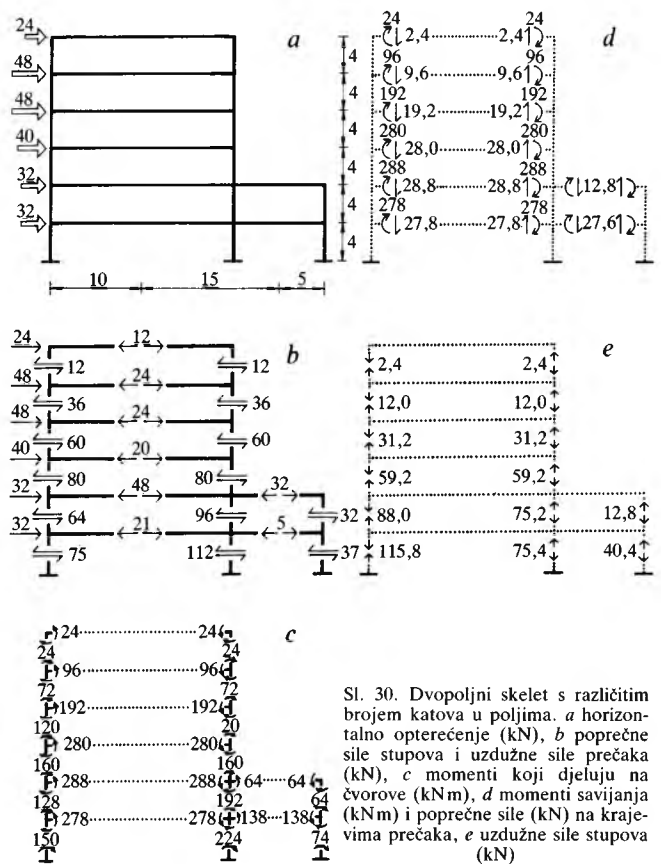
To je kritična vrijednost uzdužne sile koja uzrokuje izvijanje kata.

Koeficijent je sigurnosti protiv izvijanja kata

$$v_j = \frac{P_{j,kr}}{P_j} \quad \text{za } j = 1, 2, \dots, n. \quad (77)$$

S obzirom na taj koeficijent sigurnosti obično je mjerodavan najniži kat ($j = 1$), jer je tamo uzdužna sila najveća a obično je i visina tog kata najveća.

Stabilnost ravnoteže skeleta može se provjeriti i na osnovi stabilitetnog indeksa s_j . Taj je indeks dobra aproksimacija



Sl. 30. Dvopoljni skelet s različitim brojem katova u poljima. a horizontalno opterećenje (kN), b poprečne sile stupova i uzdužne sile prečaka (kN), c momenti koji djeluju na čvorove (kNm), d momenti savijanja (kNm) i poprečne sile (kN) na krajevima prečaka, e uzdužne sile stupova (kN)

kvocijenta uzdužne sile i kritične uzdužne sile kata:

$$s_j = \frac{P_j}{P_{j,kr}} \quad \text{za } j = 1, 2, \dots, n. \quad (78)$$

Izjednačenjem desnih strana izraza (66) i (78) opet se dobiva kritična uzdužna sila kata (76).

Kad je $P_j < P_{j,kr}/2$, dakle za sve potrebe prakse, opisani postupak daje dovoljno točne rezultate.

Sposobnost se stupova da preuzmu bočno opterećenje smanjuje s porastom uzdužne sile. Zbog toga pri projektiranju skeleta treba paziti da se neki stup ne bi izvio dok su drugi stupovi još neiskorišteni.

Kad se skeleti dimenzioniraju na osnovi gravitacijskih i bočnih opterećenja, dakle kad su skeleti bočno nepridržani, koeficijenti sigurnosti v_j (77) najčešće su veći od potrebnoga.

Vlastite vibracije ravninskih skeleta. Za analizu utjecaja vjetra i potresa na slobodne skeletne konstrukcije važno je poznavati oblik i periodu osnovnih bočnih vibracija.

Da bi se odredila osnovna perioda vlastitih vibracija, skelet se optereti bočnim silama koje su po iznosu jednake težinama G_j katova. Zatim se odrede relativni bočni pomaci Δ_j ($j = 1, 2, \dots, n$) prema izrazu (56). Ako je skelet vrlo deformabilan, treba uzeti u obzir i efekt II. reda. Ukupni bočni pomaci (sl. 25) određuju se rekurzivno superpozicijom relativnih bočnih pomaka, pa iznose

$$f_1 = \Delta_1, \quad (79a)$$

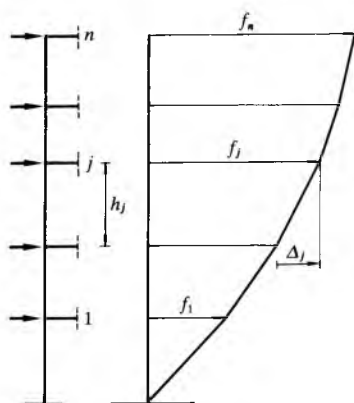
$$f_j = f_{j-1} + \Delta_j \quad \text{za } j = 2, 3, \dots, n. \quad (79b)$$

Progibna je linija ili f -linija skeleta pri osnovnim vlastitim vibracijama konkavna kad se gleda sa strane nedeformiranog skeleta (sl. 31).

Osnovna je perioda skeleta

$$T = k \sqrt{\frac{\sum G_j f_j^2}{\sum G_j f_j}}, \quad (80)$$

gdje je $k = 2 \frac{s}{\sqrt{m}}$.



Sl. 31. Oblik linije bočnih progiba skeleta pri osnovnoj vlastitoj vibraciji

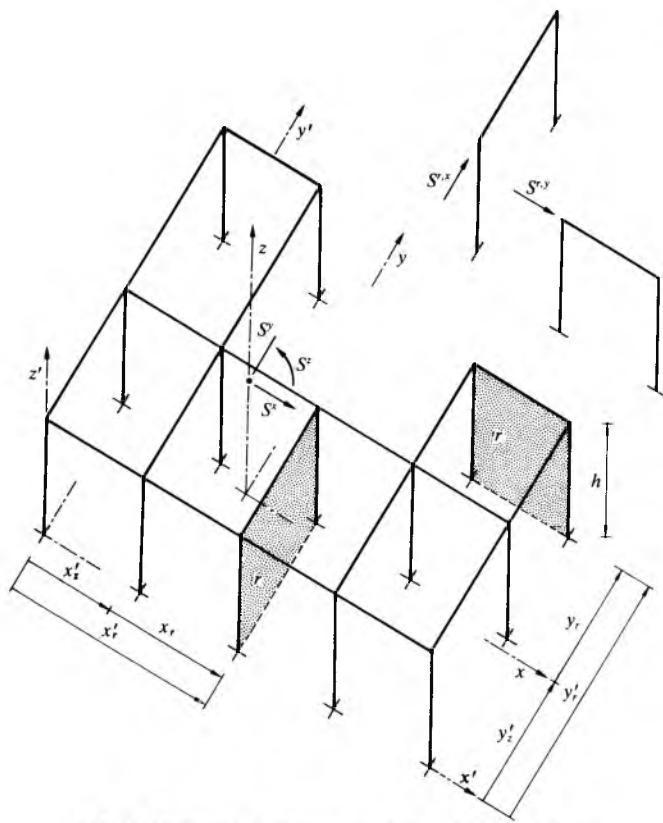
Za portal (sl. 21 a) i jednokatni skelet (sl. 19c) izraz (80) prelazi u oblik

$$T = 2\sqrt{\Delta}, \quad (81)$$

gdje je Δ bočni pomak glava stupova (32).

ODZIV PROSTORNIH SKELETA NA BOČNA OPTEREĆENJA

Odziv jednokatnog skeleta. Prostorni jednokatni skelet sastoji se od dviju serija međusobno okomitih ravninskih skeleta (sl. 32). Ishodište pomoćnog koordinatnog sustava $x'y'$ odabere se po volji, a osi su mu paralelne s ravninskim skeletima. Glavne osi skeleta x i y paralelne su s osima x' i y' .



Sl. 32. Horizontalno opterećen prostorni jednokatni skelet

Parametri, prema izrazu (9) nekog r -tog ravninskog skeleta u smjeru x i u smjeru y označeni su s $\Theta^{r,x}$ i $\Theta^{r,y}$, pa su parametri skeleta u glavnim smjerovima određeni zbrojem doprinosa pripadnih ravninskih skeleta:

$$\Theta^x = \sum \Theta^{r,x}, \quad \Theta^y = \sum \Theta^{r,y}. \quad (82)$$

Koordinate su vertikalne osi krutosti z

$$x'_z = \frac{\sum \Theta^{r,y} x'_r}{\Theta^y}, \quad y'_z = \frac{\sum \Theta^{r,x} y'_r}{\Theta^x}, \quad (83)$$

gdje su x'_r i y'_r udaljenosti r -tog ravninskog skeleta smjera y , odnosno smjera x od osi z' . Torzijski je parametar skeleta

$$\Theta^z = \sum \Theta^{r,x} y_r^2 + \sum \Theta^{r,y} x_r^2, \quad (84)$$

gdje su x_r i y_r udaljenosti r -tog ravninskog skeleta smjera y , odnosno smjera x od osi z . Sume u izrazima (82) do (84) odnose se na doprinose svih ravninskih skeleta u smjeru x , odnosno y .

Bočno se opterećenje skeleta opisuje njegovim komponentama S^x , S^y i S^z . Od bočnog opterećenja skeleta na r -ti ravninski skelet smjera x , odnosno y djeluju bočne sile

$$S^{r,x} = \frac{\Theta^{r,x}}{\Theta^x} S^x + \frac{\Theta^{r,x} y_r}{\Theta^z} S^z, \quad S^{r,y} = \frac{\Theta^{r,y}}{\Theta^y} S^y + \frac{\Theta^{r,y} x_r}{\Theta^z} S^z. \quad (85)$$

Sustav sila $S^{r,x}$, $S^{r,y}$ koji opterećuje ravninske skelete, statički je ekvivalentan opterećenju S^x , S^y i S^z cjelokupnog skeleta. Unutrašnje sile stupova i prečaka određuju se kao za ravninske skelete.

Bočne su krutosti r -tog ravninskog skeleta

$$K^{r,x} = \Theta^{r,x} K, \quad K^{r,y} = \Theta^{r,y} K, \quad (86)$$

gdje je K bočna krutost referentnog portala. Iz izraza (86) slijedi da su, sa stajališta bočne deformabilnosti, svi ravninski skeleti slični, pa su glavne krutosti skeleta

$$K^x = \Theta^x K, \quad K^y = \Theta^y K, \quad K^z = \Theta^z K. \quad (87)$$

Relativni bočni pomaci u smjerovima x i y te relativni kutni pomak oko osi z iznose

$$\Delta^x = \frac{S^x}{K^x}, \quad \Delta^y = \frac{S^y}{K^y}, \quad \Delta^z = \frac{S^z}{K^z}. \quad (88)$$

Ako skelet ima dvije vertikalne osi simetrije, os se krutosti poklapa s geometrijskom osi. Tada je obično $S^z = 0$, pa izrazi (85) i (88) postaju jednostavniji.

Odziv višekatnog skeleta. Višekatni prostorni skeleti, kao ravninski višekatni skeleti (sl. 22c), rastavljaju se u jednokatne prostorne elemente, koji se promatraju neovisno o ostalima. Parametri $\Theta^{r,x}$ i $\Theta^{r,y}$ ravninskih skeleta, a zbog toga i parametri Θ^x i Θ^y (82), parametar Θ^z (84), te koordinate x_z i y_z osi krutosti skeleta imaju konstantne vrijednosti uzduž visine skeleta, što znači da ne ovise o rednom broju kata. Takvi se prostorni skeleti nazivaju *izotropnima*.

Skelet je na kotama stropova opterećen bočnim silama S_j^x , S_j^y i S_j^z ($j = 1, 2, \dots, n$). Poprečne sile katova, T_j^x , T_j^y i T_j^z ($j = 1, 2, \dots, n$) određuju se prema jednačbi (39). Od ukupnog opterećenja na r -ti ravninski skelet smjera x i na r -ti ravninski skelet smjera y otpadaju sile

$$S_j^{r,x} = \frac{\Theta^{r,x}}{\Theta^x} T_j^x + \frac{\Theta^{r,x} y_r}{\Theta^z} T_j^z, \quad S_j^{r,y} = \frac{\Theta^{r,y}}{\Theta^y} T_j^y + \frac{\Theta^{r,y} x_r}{\Theta^z} T_j^z \quad (89)$$

za $j = 1, 2, \dots, n$.

Unutrašnje sile stupova i prečaka određuju se pomoću navedenog opterećenja kao za ravninske skelete. Stupovi su napregnuti aksijalno i na savijanje u objema glavnim ravninama, a prečke praktički samo na savijanje u svojoj vertikalnoj glavnoj ravnini.

Bočne su krutosti kata j r -tog ravninskog skeleta u smjeru x i r -tog ravninskog skeleta u smjeru y

$$K_j^{r,x} = \Theta^{r,x} K_j, \quad K_j^{r,y} = \Theta^{r,y} K_j, \quad \text{za } j = 1, 2, \dots, n, \quad (90)$$

gdje je K_j bočna krutost kata j referentnoga jednopoljnog skeleta. Superpozicijom doprinosa ravninskih skeleta dobivaju se bočne krutosti katova skeleta, pa je

$$K_j^x = \Theta^x K_j, \quad K_j^y = \Theta^y K_j, \quad K_j^z = \Theta^z K_j \quad \text{za } j = 1, 2, \dots, n, \quad (91)$$

gdje su Θ^x i Θ^y (82) te Θ^z (84) parametri skeleta.

Relativni su bočni pomaci katova

$$\Delta_j^x = \frac{T_j^x}{K_j^x}, \quad \Delta_j^y = \frac{T_j^y}{K_j^y}, \quad \Delta_j^z = \frac{T_j^z}{K_j^z} \quad \text{za } j = 1, 2, \dots, n. \quad (92)$$

Općenita formulacija jednadžbi ravnoteže. Matrica bočne krutosti izotropnog prostornog skeleta dijagonalna je matrica sastavljena od matrica bočnih krutosti u smjerovima x , y i z :

$$[K^x]_n = \Theta^x[K]_n, \quad [K^y]_n = \Theta^y[K]_n, \quad [K^z]_n = \Theta^z[K]_n, \quad (93)$$

gdje je $[K]_n$ tropojasna dijagonalna simetrična matrica (68) referentnog jednodoljnog ravninskog skeleta.

Jednadžbe ravnoteže, analognog jednadžbi (73), glase

$$[K^x]_n \{f^x\}_n = \{S^x\}_n, \quad [K^y]_n \{f^y\}_n = \{S^y\}_n, \quad [K^z]_n \{f^z\}_n = \{S^z\}_n. \quad (94)$$

Budući da su matrice bočnih krutosti tridijagonalne, jednadžbe se ravnoteže sastoje od $3n$ neovisnih jednadžbi:

$$K_j^x \Delta_j^x = T_j^x, \quad K_j^y \Delta_j^y = T_j^y, \quad K_j^z \Delta_j^z = T_j^z, \quad \text{za } j = 1, 2, \dots, n, \quad (95)$$

gdje su Δ_j^x , Δ_j^y i Δ_j^z relativni bočni pomaci katova prema izrazima (88).

STABILNOST RAVNOTEŽE PROSTORNIH SKELETA

Ako je broj stupova skeleta relativno velik i kad su težine stropova približno jednoliko raspodijeljene po tlocrtu, linija uzdužne sile svih katova prolazi težištem tlocrta, a polumjer inercije gravitacijskog opterećenja jednak je polumjeru inercije tlocrtne površine.

Ako je skelet dvostruko zrcalno simetričan, koso simetričan ili aksijalno simetričan, os se krutosti poklapa s linijom uzdužne sile. Tada su kritične uzdužne sile kata j

$$P_{j,kr}^x = K_j^x h_j, \quad P_{j,kr}^y = K_j^y h_j, \quad P_{j,kr}^z = K_j^z h_j / i^2 \quad \text{za } j = 1, 2, \dots, n \quad (96)$$

Prve dvije jednadžbe odgovaraju bočnom izvicanju u glavnim ravninama xz i yz skeleta, a treća torzijskom izvicanju oko osi krutosti z . Mjerodavna je kritična uzdužna sila kata j , dakako ona koja je najmanja.

Ako se os krutosti i linija uzdužne sile ne poklapaju, izvicanje je fleksijsko-torzijsko, a može se promatrati kao torzijsko oko osi izvicanja. Kvocijenti

$$k_y = \frac{K_j^y}{K_j^x} \quad \text{i} \quad k_z = \frac{K_j^z}{i^2 K_j^x}, \quad (97)$$

gdje je i polumjer inercije tlocrtne površine konstrukcije s obzirom na os krutosti, neovisni su, u skladu s navedenim karakteristikama skeleta, o rednom broju kata.

Ako se sa x_p i y_p označe koordinate linije uzdužne sile, može se postaviti kubna jednadžba

$$\left(1 - \frac{x_p^2 + y_p^2}{i^2}\right) p^3 - \left[\left(1 - \frac{x_p^2}{i^2}\right) + \left(1 - \frac{y_p^2}{i^2}\right) k_y + k_z\right] p^2 + (k_y + k_z + k_y k_z) p - k_y k_z = 0. \quad (98)$$

Rješenjem kubne jednadžbe dobivaju se koeficijenti p_1 , p_2 i p_3 kritične uzdužne sile, pa je

$$P_{j,kr,1} = p_1 P_{j,kr}^x, \quad P_{j,kr,2} = p_2 P_{j,kr}^x, \quad P_{j,kr,3} = p_3 P_{j,kr}^x. \quad (99)$$

I sada je mjerodavna ona kritična uzdužna sila $P_{j,kr}$ kata j koja je najmanja.

Koordinate su osi izvicanja:

$$x_{G,1} = \frac{x_p}{1 - k_y/p_1}, \quad y_{G,1} = \frac{y_p}{1 - 1/p_1}, \quad (100)$$

$$x_{G,2} = \frac{x_p}{1 - k_y/p_2}, \quad y_{G,2} = \frac{y_p}{1 - 1/p_2}, \quad (101)$$

$$x_{G,3} = \frac{x_p}{1 - k_y/p_3}, \quad y_{G,3} = \frac{y_p}{1 - 1/p_3}, \quad (102)$$

Pripadna os izvicanja leži u kvadrantu koordinatnog sustava xy , koji je dijagonalno suprotan kvadrantu u kojem je linija uzdužne sile.

Koeficijent je sigurnosti protiv izvicanja kata j

$$v_j = \frac{P_{j,kr}}{P_j} \quad \text{za } j = 1, 2, \dots, n, \quad (103)$$

a mjerodavan je onaj koeficijent koji je najmanji.

Pri izvicanju deformira se samo kritični kat, dok se ostali katovi samo pomiču, ali se ne deformiraju. Najčešće je kritičan najniži kat, jer je tamo najveća uzdužna sila, a često je taj kat i viši od ostalih katova.

VLASTITE VIBRACIJE PROSTORNIH SKELETA

Kad se pretpostavi da je masa stropova jednoliko raspodijeljena po tlocrtu, vertikalna os mase svih katova prolazi težištem tlocrta, a polumjer je inercije mase jednak polumjeru inercije tlocrtne površine. Koordinate osi mase poklapaju se s koordinatom x_p, y_p linije uzdužne sile, a polumjer inercije mase s obzirom na os krutosti poklapa se s polumjerom inercije gravitacijskog opterećenja.

Ako je skelet dvostruko zrcalno simetričan, koso simetričan ili aksijalno simetričan, osi se krutosti i mase poklapaju, a periode osnovnih bočnih vibracija u glavnim ravninama xz i yz iznose

$$T^x = 2\sqrt{\frac{\sum G_j f_j^{x2}}{\sum G_j f_j^x}}, \quad T^y = 2\sqrt{\frac{\sum G_j f_j^{y2}}{\sum G_j f_j^y}} \quad \text{za } j = 1, 2, \dots, n. \quad (104a)$$

Ukupni bočni pomaci f_j^x i f_j^y stropova u smjerovima x i y zbog djelovanja horizontalnih sila određuju se kao za ravninske skelete. Horizontalne su sile jednake po iznosu težinama stropova G_j .

Za jednokatni skelet periode iznose

$$T^x = 2\sqrt{\Delta^x}, \quad T^y = 2\sqrt{\Delta^y}. \quad (104b)$$

Ako se osi krutosti i mase ne poklapaju, bočne su vibracije fleksijsko-torzijske, a mogu se smatrati torzijskim oko vertikalnih osi vibracije. Da bi se odredile periode triju osnovnih vlastitih vibracija, treba riješiti kubnu jednadžbu

$$t^3 - \left(1 + \frac{1}{k_y} + \frac{1}{k_z}\right) t^2 + \left[\frac{1}{k_y} + \left(1 - \frac{y_p^2}{i^2}\right) \frac{1}{k_z} + \left(1 - \frac{x_p^2}{i^2}\right) \frac{1}{k_y k_z}\right] t - \left(1 - \frac{x_p^2 + y_p^2}{i^2}\right) \frac{1}{k_y k_z} = 0, \quad (105)$$

gdje su k_y i k_z koeficijenti prema izrazima (97), a i polumjer inercije tlocrtne površine. Rješenje kubne jednadžbe daje koeficijente t_1 , t_2 i t_3 periode pomoću kojih se određuju periode osnovnih vlastitih vibracija:

$$T_1 = T^x \sqrt{t_1}, \quad T_2 = T^x \sqrt{t_2}, \quad T_3 = T^x \sqrt{t_3} \quad (106)$$

i koordinate osi vibracija:

$$x_{T,1} = \frac{x_p}{1 - k_y t_1}, \quad y_{T,1} = \frac{y_p}{1 - t_1}, \quad (107)$$

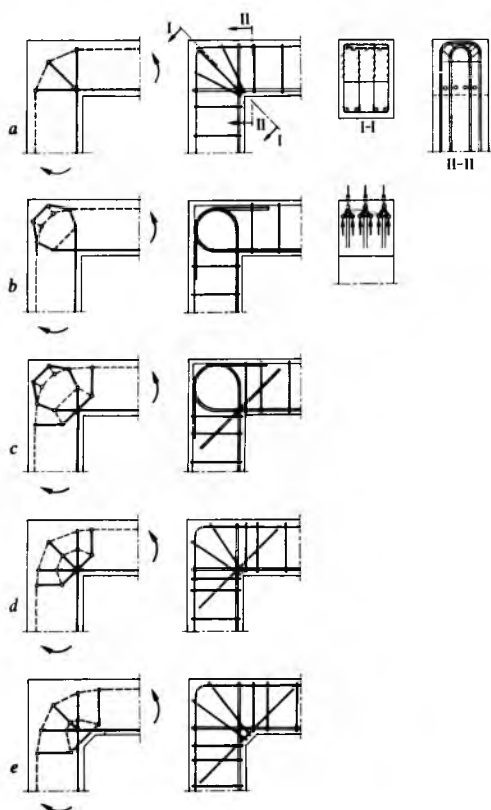
$$x_{T,2} = \frac{x_p}{1 - k_y t_2}, \quad y_{T,2} = \frac{y_p}{1 - t_2}, \quad (108)$$

$$x_{T,3} = \frac{x_p}{1 - k_y t_3}, \quad y_{T,3} = \frac{y_p}{1 - t_3}, \quad (109)$$

gdje su x_p i y_p koordinate linije uzdužne sile.

ARMIRANJE ARMIRANOBETONSKIH SKELETA

Stupovi i prečke armiranobetonskih skeleta armiraju se glavnom (uzdužnom) i poprečnom armaturom (sponama). Da bi se adekvatno armirali čvorovi, poželjno je, na osnovi predodžbe trajektorija tlačnih i vlačnih glavnih naprezanja, tok unutarnjih sila simulirati sustavom tlačnih i vlačnih



Sl. 33. Štapni modeli (lijevo) i odgovarajuće armature (desno) čvora što ga čine prvi stup i najgornja prečka. a i b jednostavniji, c, d i e složeniji sustavi

štapova. Tlačne štapove (pune crte) ostvaruje beton, a vlačne štapove (isprekidane crte) armatura. Slika 33 prikazuje nekoliko štapnih modela (lijevo) i odgovarajuću armaturu (desno) za čvor što ga čine prvi (lijevi) stup i najgornja prečka ako u čvoru djeluju pozitivni momenti savijanja. Armiranje prema slici 33a i b vrlo je jednostavno, a armiranje prema slici 33c, d i e nešto je složenije, ali daje i veću čvrstoću čvora.

LIT.: C. Siegel, Strukturformen der modernen Architektur. Callwey, München 1960. – R. Rosman, Berechnung gekoppelter Stützensysteme im Hochbau. Ernst & Sohn, Berlin 1975. – W. Schueller, High-Rise Building Structures. John Wiley, New York 1977.

R. Rosman

SKLONIŠTA, građevine i prostorije koje su tako konstruirane i opremljene uređajima i instalacijama da mogu zaštititi stanovništvo i sklonjena dobra od djelovanja atomskih, kemijskih i drugih razornih oružja.

Težnju ljudi da se zaštite od ratnih opasnosti potvrđuje razvoj gradnje zaštitnih građevina kroz stoljeća. Stupanj zaštite ovisio je o razvoju oružja i o tehničkoj i ekonomskoj mogućnosti zaštite. U pripremama za obranu nastojalo se unaprijed procijeniti sve mogućnosti napadača. Budući da su se razaranja odvijala na teritorijima na kojima su se kretale i sukobljavale vojske, obrana se sastojala u gradnji utvrđenih zamkova i gradova. To su bila u stvari višenamjenska skloništa.

Razvoj razornih sredstava (v. *Oružje*, TE 10, str. 1; v. *Oružni sistemi*, TE 10, str. 18) i mogućnosti njihova brzog dopremanja duboko u neprijateljski teritorij, omogućilo je rušenje cijelih gradskih četvrti, pa i cijelih gradova. Za vrijeme drugoga svjetskog rata razvila se strategija rušenja gradova i industrijskih pogona te demoralizacija stanovništva bombardiranjem iz zraka. Za zaštitu od bombardiranja služile su podrumске prostorije (pojačane gredama i stupovima) i tuneli podzemne željeznice. U nekim su gradovima izgrađena velika skloništa. Tako je, npr., u Berlinu u Tiergartenu izgrađeno sklonište za 20000 ljudi koje je imalo dimenzije tlocrta 71 × 71 m i visinu od 37 m s gornjom armiranobetonskom pločom debljine 3,5 m i sa zidovima debljine 2,5 m. Takva su skloništa pružala stanovništvu za vrijeme bombardiranja relativno sigurnu zaštitu.

Potkraj drugog svjetskog rata pokušalo se takva *neprobojna skloništa* uništiti plamenim orkanom pomoću mnogo zapaljivih bomba. Njihovim

izgaranjem toliko bi se povisila temperatura u okolišu i u skloništima da su ona postala masovne grobnice (Dresden, Hamburg).

U drugom se svjetskom ratu smatralo da dovoljne količine armiranog betona i dovoljan sloj zemlje, te maske protiv bojnih otrova (koji nisu upotrijebljeni) pružaju dovoljnu zaštitu. To je mišljenje opovrgnuto nakon što su bačene prve dvije nuklearne bombe razorne moći 15·10³ t i 20·10³ t trinitrotoluola (TNT). Dalji razvoj nuklearnog oružja omogućio je proizvodnju fisijskih nuklearnih bomba mnogo veće razorne moći, fuzijskih nuklearnih i neutronske bombe (v. *Nuklearno oružje*, TE 9, str. 530). Razvoj raketa velikog dometa omogućio je vrlo brzi prijenos tih bomba do najudaljenijih područja našeg planeta (v. *Oružni sistemi*, TE 10, str. 23; v. *Pogonski sistemi letjelica*, TE 10, str. 547). Budući da postoji cijeli arsenal nuklearnih bomba, razvijena je doktrina nuklearnog protuudara. Polazi se, naime, od pretpostavke da je nuklearno naoružanje napadnutog toliko da omogućuje protuudar na napadača koji je dovoljan za njegovo potpuno uništenje. Proučavanjem djelovanja nuklearnih eksplozija pokazalo se da se razaranja i djelovanje zračenja u eventualnom nuklearnom ratu neće ograničiti samo na teritorije zaraćenih zemalja, nego će se proširiti na cijeli svijet, što bi uzrokovalo nesagledive negativne posljedice za cijelo čovječanstvo.

Dosadašnje iskustvo, međutim, pokazuje da se i usprkos postojanju golemih zaliha nuklearnog oružja ratovi vode konvencionalnim oružjima i da se nastoje izbjeći sukobi velikih razmjera. Nakon drugoga svjetskog rata registrirano je oko 150 manjih ili većih oružanih sukoba u kojima je stradalo oko 16 milijuna ljudi. Postoji, dakle, mogućnost i lokalnih sukoba i globalnog rata. U slučaju globalnog sukoba bilo bi dovoljno 90 nuklearnih bomba ukupne razorne moći od 3·10⁶ t TNT koje bi eksplodirale iznad većih gradova da već prvog dana pogine 13·33% stanovnika na našem planetu.

U skladu s tim mogućnostima gradnja je skloništa, kao dijela neposredne zaštite stanovništva, jedini mogući odgovor na potencijalnu opasnost. Problem zaštite od nuklearnog napada, međutim, nije riješen današnjim načinom gradnje skloništa. Zaštita je od konvencionalnih razornih oružja, naime, mnogo jednostavnija, jer su razaranja pa i eventualna kontaminacija prostorno ograničeni. Nasuprot tome nuklearnim se eksplozijama onečišćuju radioaktivnim zračenjima vrlo velika područja s dugotrajnim negativnim djelovanjem.

Principi zaštite i gradnje skloništa danas se uglavnom zasnivaju na iskustvima ograničenih ratnih pustošenja u drugom svjetskom ratu dopunjenih spoznajama o efektima radioaktivnog onečišćenja.

Zaštita stanovništva ostvaruje se, osim neposrednom, i posrednom zaštitom. Posredna se zaštita ostvaruje smanjenjem povredljivosti gradskih površina (ograničena visina zgrada), osiguranjem mogućnosti brze evakuacije stanovništva iz ugroženih zona (smještaj prometnih koridora izvan dosega materijala od srušenih zgrada), mogućnošću privremenog boravka na otvorenom prostoru (raspored zelenih površina) i decentralizacijom izgrađenih gradskih zona.

Posrednom i neposrednom zaštitom ne teži se ostvarenju potpune zaštite stanovništva, jer se ona ni tehnički ni ekonomski ne može ostvariti. Teži se, međutim, takvoj zaštiti koja ekonomski opravdano omogućuje optimalnu zaštitu stanovništva i materijalnih dobara.

Vrste skloništa. Skloništa u širem smislu mogu se svrstati na zaklone i skloništa u užem smislu.

Zakloni pružaju minimalnu zaštitu. Oni mogu biti samostalni (otvoreni i pokriveni rovovi, jame), zakloni u građevinama (ojačani podrumi) i u prirodi (spilje i sl.).

Skloništa mogu biti izgrađena kao samostalna ili u sklopu građevina, dok se prema veličini razlikuju vrlo mala skloništa (do 7 osoba), mala (7·50 osoba), srednja (50·100 osoba), velika (100·300 osoba) i vrlo velika (300·2000 osoba). Vrlo mala i mala skloništa nazivaju se i obiteljskim skloništima.

Skloništa mogu biti jednonamjenska (koja se upotrebljavaju samo za vrijeme rata), specijalna (koja služe za posebne namjene: vojne, upravne i sl.) te dvonamjenska i višenamjenska (koja u miru služe u mirnodopske svrhe, a pri neposrednoj ratnoj opasnosti pretvaraju se u skloništa).

Prema stupnju zaštite razlikuju se skloništa za dopunsku, osnovnu i pojačanu zaštitu, a stupanj zaštite ovisi o otpornosti konstrukcije prema djelovanju nadtlaka. Skloništa za dopunsku zaštitu moraju izdržati nadtlak od 50 kPa, skloništa za osnovnu zaštitu nadtlak od 100, 200, odnosno 300 kPa (prema procjeni ugroženosti), a skloništa za pojačanu zaštitu nadtlak veći od 300 kPa. Stupanj zaštite određuje općinska skupština u skladu s procjenom ugroženosti područja.

Osim mehaničkog opterećenja na konstrukciju skloništa utječu toplinske, radijacijske, kemijske i elektromagnetske pojave koje su posljedica eksplozije.

Mehaničko djelovanje konvencionalnih napadnih sredstava pojavljuje se kao udar bombe ili projektila, kao prodor kroz konstrukciju skloništa ili u tlo u blizini skloništa, kao eksplozija u zraku, i kao djelovanje krhotina rasprsnute bombe ili projektila, odnosno razorenih građevina. Mehaničko djelovanje nuklearnih napadnih sredstava pojavljuje se kao udarni tlačni val (v. *Nuklearno oružje*, TE 9, str. 533).