

N

NABORANE KONSTRUKCIJE (nabori), konstrukcije sastavljene iz dvaju ili više ravninskih elemenata koji nisu u istoj ravnini.

Naborane konstrukcije grade se tek nekoliko desetljeća, jer su tek pronalaskom armiranog betona stvorene osnove za njihovu primjenu.

Pravocrtni bridovi uzduž kojih se sastaju ravnine dvaju susjednih ravninskih elemenata čine sljemena ili grebene i uvale naborane konstrukcije. Nosivost i krutost nabora ostvaruje se u prvom redu prikladnim oblikovanjem njihove srednje plohe, a u mnogo manjoj mjeri debljinom ravninskih elemenata iz kojih se nabor sastoji.

Ravninski elementi (elementi u jednoj ravnini) nazivaju se *pločama* ako su opterećeni pretežno okomito na svoju ravninu, a *diskovima* ako su opterećeni pretežno u svojoj ravnini. Kako su nosivost i krutost ravninskih elemenata u njihovoj ravnini bitno veće od nosivosti, odnosno krutosti okomito na tu ravninu, povoljnije je ravninske elemente iskoristiti kao diskove nego kao ploče. Ravninski elementi u naborima djeluju i kao ploče i kao diskovi.

Naborane konstrukcije mogu se svrstati u štapne i piramidne naborane konstrukcije.

Štapni nabori prenose opterećenje u jednom smjeru, i to u smjeru svoga raspona. Povoljno mehaničko ponašanje nabora osniva se na pretpostavci da je spriječena promjena oblika njihovih poprečnih presjeka, tj. presjeka okomitih na raspon. Očuvanje oblika poprečnih presjeka pri opterećenju postiže se dijafragmama. To su ravninski konstrukcijski elementi koji u svojoj ravnini moraju biti vrlo kruti, dok njihova krutost okomito na tu ravninu može biti zanemarljivo malena.

Ravninski elementi nabora prenose svoje opterećenje tangencijalnim silama na dijafragme, a one ga dalje prenose na vertikalnu nosivu konstrukciju, tj. na stupove ili zidove.

Nabor oslonjen na dvije dijafragme prosta je greda s jednim prepustom, sa dvama prepustima ili bez njih. Ako je oslonjen na tri ili više dijafragmi, tako da ima dva ili više raspona, nabor je kontinuirana greda bez prepusta ili s njima. Konzola je nabor koji je na jednom kraju ukliješten, a na drugome slobodan.

U smjeru okomito na raspon nabori djeluju kao kontinuirane ploče; njeni unutrašnji ležaji dati su uzdužnim bridovima nabora.

Prizmatični nabori jesu konstrukcije u obliku prizmatičnih površina, dakle translacijskih površina s poligonalnom vodi-ljom i pravolinijskim izvodnicama, kojima su pravokutne po-bočke izdužene u smjeru izvodnica. Prizmatični nabori mogu se definirati i kao štapni nabori kojima je poprečni presjek uzduž raspona nepromjenljiv.

Aprizmatični nabori jesu konstrukcije u obliku trapezoidnih površina (trapezoid je četverokut kojemu su dvije stranice pa-ralelne) izduženih u smjeru okomito na paralelne stranice i sastavljenih uzduž neparalelnih stranica. Konstrukcije u obliku izduženih trokutnih površina specijalan su primjer aprizmatič-nih nabora. Aprizmatični nabori mogu se definirati i kao štapni nabori kojima je poprečni presjek uzduž raspona promjenljiv.

Naborane konstrukcije često su sastavljene od naboranih elemenata nanizanih, u poprečnom smjeru, jedan do drugoga. Već prema broju elemenata govori se o naborima s jednim, više i mnogo polja. Naboranim elementima konstantne širine prekrivaju se pravokutni tlocrti sastavljeni od pravokutnika. Naboranim elementima promjenljive širine prekrivaju se najraz-ličitiji tlocrti: kružni, poligonalni, prstenasti, trapezni, ali i pravokutni tlocrti.

Poliedarski nabori jesu konstrukcije u obliku pravilnih ili nepravilnih poliedarskih površina, dakle površina sastavljenih iz jednakih ili različitih pravilnih ili nepravilnih poligona, ko-jima su dužine svih bridova istog reda veličine.

Armirani beton najprikladniji je i najčešće primjenjivani građevni materijal za nabor. Budući da se konstrukcija sastoji iz ravninskih elemenata, oplata je mnogo jednostavnija i eko-nomičnija od oplata za zakrivljene ljuskaste konstrukcije. Nagib ravninskih elemenata nabora ne treba da bude veći od $\sim 40^\circ$, da bi se izbjegla dvostruka oplata.

Primjenom pretfabriciranih armiranobetonskih dijelova skra-ćuje se trajanje gradnje. To je skraćivanje to veće što su dijelovi konstrukcije veći. Za montažu velikih i time teških dijelova potrebne su snažne dizalice.

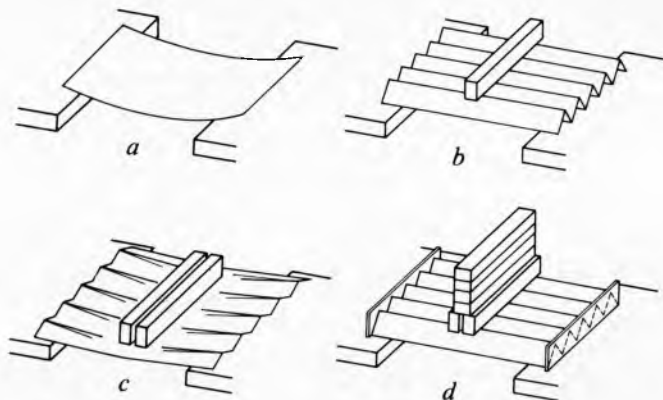
Za premošćivanje velikih raspona često se primjenjuju nabori od prednapregnutog betona. Pretfabricirane naborane elemente koji djeluju kao proste grede svrsishodno je prethodno pred-napregnuti. Takvi su elementi tanji, pa su i lakši. Kad se naborani elementi betoniraju na gradilištu i kad se upotrebljavaju naborani elementi od pretfabriciranih dijelova, primjenjuje se naknadno prednaprezanje, tj. prednaprezanje pomoću kabela. Zbog toga što su tada potrebne cijevi za kabele, debljine su takvih nabora veće nego kad se primjenjuje prethodno predna-preziranje.

Čelični i aluminijski nabori sastoje se od pojasova i štapova ispune. Cijevni su profili najpovoljniji. To vrijedi i s obzirom na formiranje čvorova. Gradnja čeličnih nabora ne iziskuje oplatu, niti su potrebne snažne dizalice. Deformacije i stabilnost, međutim, češće su mjerodavnije pri projektiranju metalnih nego armiranobetonskih nabora. Ponekad se umjesto štapova ispune upotrebljavaju trapezni limovi. Kad su nabori malih raspona, pojasovi se mogu spojiti valovitim pločama od poliesterskih smola armiranih staklenim nitima. Tako se dobivaju providni krovovi.

Drveni su nabori najčešće od lijepljenih ploča. Nabori od zida su rijetki. Plastične se mase također primjenjuju za gradnju nabora; ravninski elementi tada se najčešće izrađuju od višeslojnih ploča. Primjena željezo-cementa (tanke čelične šipke, cement, pijesak i voda) za naborane konstrukcije tek je u začetima.

PRIZMATIČNI PUNI GREDNI NABORI

Mehaničko ponašanje prizmatičnih punih grednih nabora vrlo je instruktivno rastumačio C. Siegel pomoću papirnato modela. Ravan list papira ne može nositi ni sebe (sl. 1a),



Sl. 1. Ilustracija mehaničkog ponašanja prizmatičnih grednih nabora na osnovi papirnato modela

Nabora li se list papira, visina se poprečnog presjeka i time krak unutrašnjih sila, koji iznosi $2/3$ visine poprečnog presjeka, bitno povećaju, pa nosi ne samo sebe nego još i dodatni teret (sl. 1b). Uz dalje povećanje opterećenja nabor se spljošćuje, smanji se visina poprečnog presjeka i time krak unutrašnjih sila, pa nabor popusti (sl. 1c). Spriječi li se spljošćenje nabora, npr. dijafragmama na njegovim čelnim ploham, nosivost će se ponovno bitno povećati (sl. 1d). Ono što vrijedi za papirni model vrijedi u principu i za inženjerske konstrukcije.

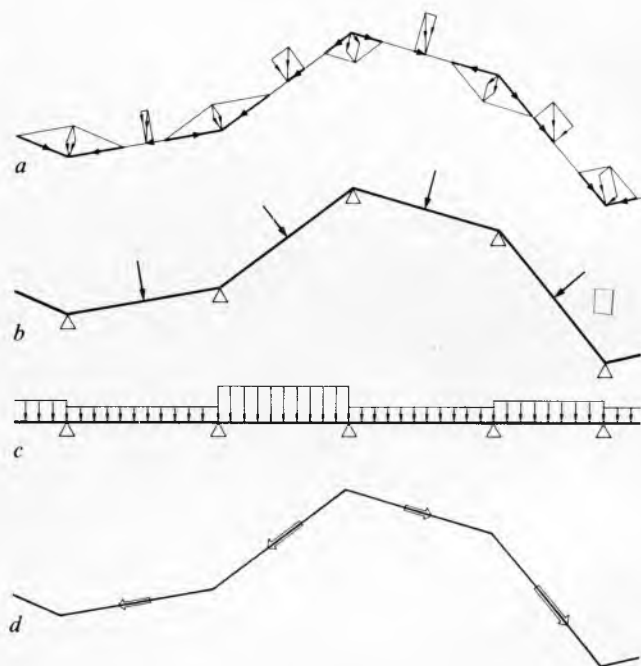
Mjerodavno opterećenje krovnih konstrukcija sastoji se od vlastite težine i snijega. Pri projektiranju nosive konstrukcije opterećenje se može smatrati jednoliko raspodijeljenim po ravninskim elementima nabora. Vlastita težina proračunava se na jedinicu površine ravninskih elemenata. Težina snijega određena je u propisima o opterećenju zgrada po jedinici tlocrtna površine, dakle po jedinici horizontalne projekcije ravninskih elemenata.

Opterećenje vlastitom težinom i snijegom, koje je, dakako, vertikalno, zamišlja se rastavljenim u dvije komponente, i to u komponentu okomitu na promatrani ravninski element nabora i u komponentu u ravnini toga elementa (sl. 2a). Opterećenje u ravnini elementa prenosi se neposredno na dijafragme jer element djeluje kao disk, a opterećenje okomito na element prenosi se na uzdužne bridove jer element djeluje kao ploča. Akcije na bridovima obiju susjednih ploča superponiraju se u rezultantnu akciju, a ta se rastavi u komponente u smjeru obaju susjednih elemenata. Svaki element, koji djeluje kao disk, prenosi svoje opterećenje na dijafragme. Evidentno je da kutovi koji zatvaraju susjedni ravninski elementi nabora ne smiju biti premaleni, da se ne bi dobile prevelike sile pri rastavljanju rezultantnih akcija na bridove. Prema tome, opterećenje u naborima prenosi se dvojako kako slijedi.

U smjeru okomitom na raspon nabor djeluje kao kontinuirana prelomljena ploča oslonjena na uzdužne bridove (sl. 2b). Može se pokazati da se unutrašnje sile mogu lakše odrediti analizom horizontalne projekcije ploče (sl. 2c); pri pronalaženju opterećenja na jedinicu horizontalne duljine treba vlastitu težinu, jer je ona podijeljena po kosoj površini, povećati dijeleljenjem s kosinusom kuta nagiba promatrane ploče. Tako određene unutrašnje sile nazivaju se unutrašnjim silama u poprečnom smjeru nabora.

U smjeru raspona ravninski elementi nabora djeluju kao diskovi oslonjeni na dijafragme. Na svaki unutrašnji ravninski element nabora djeluju, u njegovoj ravnini, tri opterećenja: opterećenje dobiveno rastavljanjem opterećenja elementa u komponente, opterećenje od rezultantne akcije na lijevi brid i opterećenje od rezultantne akcije na desni brid elementa. Superpozicijom tih triju opterećenja dobiva se ukupno opterećenje elementa u njegovoj ravnini (sl. 2d). Uzduž nabora to je opterećenje najčešće jednoliko raspodijeljeno. Nabor kao cjelina djeluje, dakle, kao greda, a raspon te grede jednak je razmaku dijafragmi. Tako određene unutrašnje sile nazivaju se unutrašnjim silama u uzdužnom smjeru nabora ili membranskim unutrašnjim silama. Opisani dvojaki prijenos opterećenja tipičan je za naborane konstrukcije.

U dosadašnjem razmatranju unutrašnje sile u poprečnom smjeru nabora i unutrašnje sile u uzdužnom smjeru nabora određene su neovisno jedne o drugima. To je bilo moguće jer je prešutno pretpostavljeno da su ležaji kontinuirane ploče, tj. uzdužni bridovi nabora, nepomični. Ta je pretpostavka prihvatljiva za većinu ispravno konstruiranih nabora. Tada je, naime, zanemarljiva interakcija unutrašnjih sila u poprečnom i unutrašnjih sila u uzdužnom smjeru nabora.

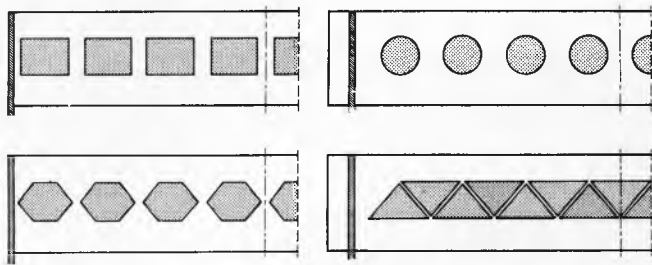


Sl. 2. Prijenos opterećenja u prizmatičnim grednim naborima (radi jednostavnijeg prikaza opterećenje je prikazano jednom koncentriranom silom u polovištu svakog polja)

Smjernice za projektiranje. Uobičajeni su rasponi nabora 15–40 m. Prepusti duljine do $1/3$ raspona konstruktivno su povoljni jer smanjuju momente savijanja u susjednom polju i progibe. Visine poprečnih presjeka nabora iznose $1/15 \dots 1/25$ raspona. Uobičajena je debljina 8–12 cm, a za nabore velikih raspona i do 20 cm. Da vlastita težina ne bi bila prevelika, razmak uzdužnih bridova ne bi trebao biti veći od 6 m, ali je u praksi rijetko veći od 3–4 m.

Ako je u jednopoljnim naborima prvi unutrašnji disk strm u poprečnom smjeru, rubni je disk često horizontalan. Ako je pak prvi unutrašnji disk položit, rubni je disk često vertikalni. Općenitije rečeno, rubni i prvi sljedeći disk treba da zatvaraju kut što bliži pravom kutu. Tada je deformacija poprečnih presjeka nabora minimalna i postiže se efekt sličan efektu sekundarnih dijafragmi. Prepusti ploča u poprečnom smjeru nabora ne smiju biti predugi, kako bi se izbjegli preveliki konzolni momenti savijanja.

Nadsvjetla u naboranim krovovima mogu se ostvariti nizovima otvora u ravninskim elementima nabora. Otvori su najčešće pravokutni, šesterokutni, okrugli ili trokutni (sl. 3). Perfo-



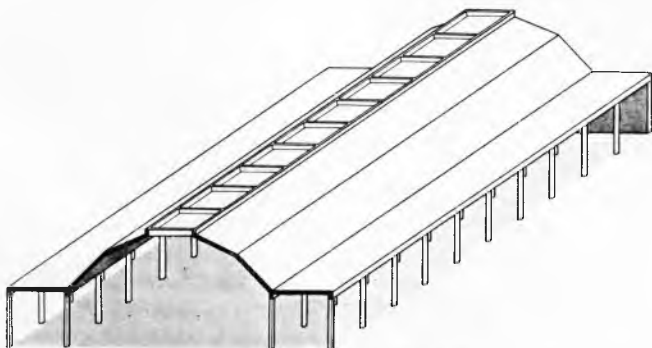
Sl. 3. Oblici otvora za rasvjetu u elementima nabora

rirani ravninski elementi djeluju u svojoj ravnini kao raščlanjeni diskovi. Kad su otvori pravokutni, šesterokutni ili okrugli, stupci između otvora djeluju kao prečke, pa su napregnuti na savijanje i smicanje. Kad su otvori u obliku trokuta, stupci između otvora djeluju kao štapovi ispune rešetkastih nosača; napregnuti su pretežno aksijalno, tj. na pritisak ili zatezanje. To se može izraziti i tako da stupci između otvora djeluju kao moždanici koji povezuju gornji i donji dio diska. U konstrukcijama s pravokutnim, šesterokutnim ili okruglim otvorima stupci su zbog svoje širine, a u konstrukcijama s trokutnim otvorima zbog karaktera naprezanja tako kruti da se većinom mogu smatrati nedeformabilnima. Zbog toga otvori samo neznatno smanjuju nosivost i krutost diska.

Dodatni ležaji nabora. Nabori predaju opterećenje dijafragmama pa dodatni ležaji nisu potrebni. Ponekad se ispod jednog ili nekoliko uzdužnih bridova ili uzdužnih rubova nabora nalaze zidovi koji razdvajaju unutrašnji prostor, odnosno zatvaraju građevinu prema vani. Ako su ti zidovi nosivi, oni naboru pružaju dodatni linijski ležaj i time uglavnom povoljno utječu na unutrašnje sile. Lagane fasadne zidove i lagane pregradne zidove treba ukrutiti stupovima na relativno malim razmacima. Takav niz stupova, slično kao i nosiv zid, predstavlja za nabor više-manje kontinuirani linijski ležaj. Linijski ležaj može se smatrati vertikalno nepomičnim, a u poprečnom smjeru nabora okretnim i horizontalno pomičnim. Ponekad se nabor od zida odvaja kliznom fugom. Uzduž dodatno poduprtih bridova nabor se obično pojačava malim pojasom koji je najčešće vlačno napregnut.

Uzdužan brid ili uzdužan rub nabora može se poduprijeti i vertikalnim punim ili raščlanjenim diskom oslonjenim na dijafragme. Takve diskove, međutim, ne treba promatrati kao ležaj, nego kao sastavni dio nabora.

Na sl. 4 vidi se naborani krov trobrodne hale koji se sastoji od bačvastog nabora nad unutrašnjim i od jedne horizontalne ploče nad vanjskim poljima. Na čelnim stranama nabor je oslonjen na zidove koji zatvaraju prostor i ujedno djeluju kao dijafragme. Uzdužni rubovi horizontalnih ploča nad vanjskim poljima hale dodatno su poduprti stupovima, tako da nisu mogući vertikalni pomaci tih rubova. Uzduž bridova oslonjenih na stupove nabor je pojačan s malim zategnutim pojasom. Srednja ploča srednjeg polja nije puna nego se sastoji iz prečki na relativno malom razmaku; one djeluju kao razupore. Prijelazi od tih prečki na susjedne nagnute ploče oblikovani su kao mali pritisnuti pojasovi koji ujedno služe kao ležaj za konstrukciju nadsvijetla.



Sl. 4. Naborani krov trobrodne hale

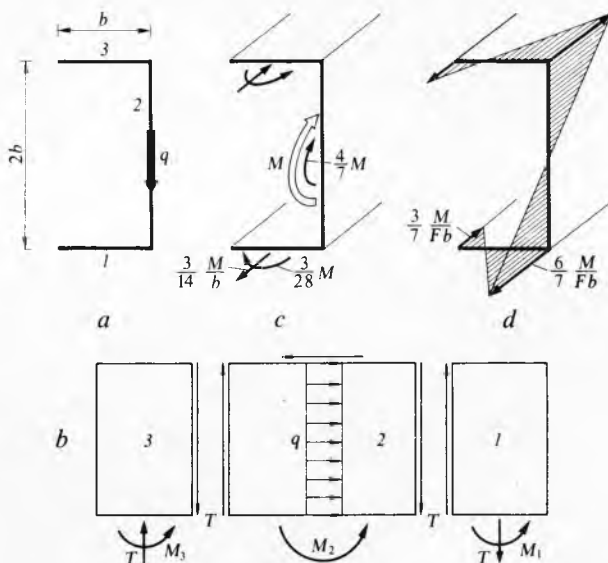
U-nabori su nabori u obliku slova U. Da se odrede membranske unutrašnje sile, naponi i pomaci nabora, neka je b širina pojasova, F površina presjeka pojasa, $2b$ visina hrpta, a $2F$ njegova površina. Ako na nabor u ravnini njegova hrpta djeluje jednoliko raspodijeljeno poprečno opterećenje q po jedinici duljine nabora (sl. 5a), stanje napona je antisimetrično s obzirom na ravninu simetrije nabora.

Na sl. 5b prikazan je u ravninu prevallen isječak nabora od krajnje dijafragme do poprečnog presjeka u kojemu je gredna poprečna sila jednaka nuli, a gredni moment savijanja maksimalan. Pojasovi i hrbat su odvojeni, odnosno točnije rečeno, uzduž bridova u kojima se sastaju pojasovi i hrbat uvedena su nulpolja tangencijalne sile. Hrbat djeluje na pojasove, a pojasovi na hrbat silom smicanja T . Sile su pozitivne ako djeluju u prikazanim smjerovima. Brojevima 1 i 3 označeni su donji, odnosno gornji pojas, a sa 2 hrbat.

Izduženja pojasova i hrpta uzduž bridova u kojima se sastaju moraju biti jednaka. Kako je modul elastičnosti pojasova i hrpta jednak, moraju i normalni naponi biti jednaki. Izraze li se momenti otpora poprečnih presjeka diskova 1 i 2 pomoću F i b , na osnovi sl. 5b dobiva se

$$\frac{4T}{F} = \frac{3M}{2Fb} - \frac{3T}{F}, \quad (1)$$

gdje je M gredni moment savijanja u promatranom poprečnom presjeku nabora.



Sl. 5. Pun gredni nabor U-presjeka opterećen u ravnini hrpta s prikazom unutrašnjih sila i normalnih napona

Ako je nabor prosta greda raspona L , mjerodavni gredni moment savijanja iznosi $qL^2/8$. Ako je nabor, međutim, kontinuirana greda s više jednakih ili približno jednakih raspona, za gredni moment savijanja unutrašnjih polja može se uzeti da iznosi $qL^2/24$, a za gredni moment savijanja unutrašnjih ležaja $-qL^2/12$. Uzme li se u obzir utjecaj redistribucije unutrašnjih sila zbog plastičnih deformacija, postupkom uobičajenim pri analizi armiranobetonskih greda dobivaju se nešto veći momenti polja, a nešto manji ležajni momenti.

Iz izraza (1) za hiperstatičku veličinu, silu smicanja koja djeluje uzduž bridova nabora, dobiva se

$$T = \frac{3M}{14b}. \quad (2)$$

Sl. 5c prikazuje unutrašnje sile diskova nabora. Hrbat je napregnut na savijanje, donji pojas na ekscentrični vlak, a gornji pojas na ekscentrični tlak. Hrbat preuzima $4/7$ grednog momenta savijanja. Ostatak grednog momenta savijanja preuzima se parom sila, što ga formiraju uzdužne sile u pojasovima. Momenti savijanja gornjeg i donjeg pojasa brojčano su jednaki ali suprotnog smisla, tako da čine bimoment.

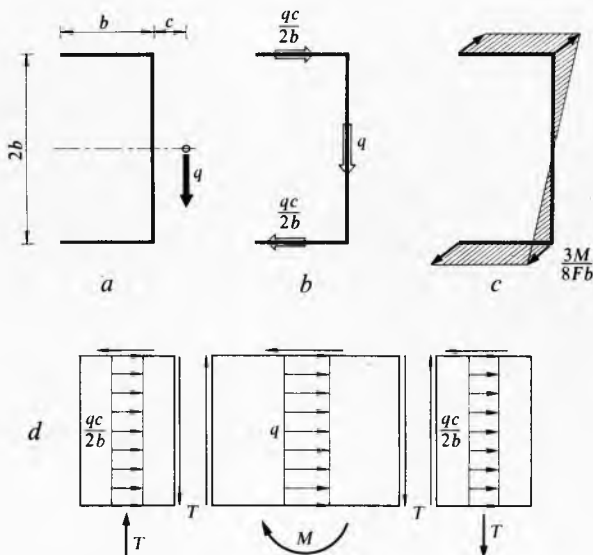
Normalni naponi u poprečnim presjecima nabora dobiju se superpozicijom doprinosa uzdužne sile i momenta savijanja odnosnog diska; oni u svim trima diskovima mijenjaju predznak. Dijagram normalnog napona (sl. 5d) nema pravocrtne nullinije. Može se pokazati da prikazani dijagram normalnih napona vrijedi za sve poprečne presjeka, tj. za cijelu duljinu nabora. Gredni moment savijanja M uvijek se odnosi na promatrani presjek.

Tangencijalni naponi nisu mjerodavni pri projektiranju, pa se ni ne promatraju.

Budući da se pojasovi savijaju u suprotnim smjerovima, opterećenje ne samo progiblje nego i tordira nabor.

Sile i naponi određeni su, već prema spomenutom, pomoću membranske teorije nabora. Alternativno oni se mogu odrediti i primjenom teorije tankozidnog štapa tako da se superponiraju doprinosi pravog savijanja i prinudne torzije. C. Kollbrunner je dokazao za bilo kako oblikovane naborove, da oba postupka daju jednake rezultate ako broj diskova od kojih se nabor sastoji nije veći od tri.

Ako je nabor umjesto u ravnini hrpta preko poprečnih konzola opterećen izvan ravnine hrpta (sl. 6a), naponsko stanje je povoljnije. Da se analizira tako opterećeni nabor, opterećenje se zamišlja pomaknutim u ravninu hrpta (sl. 6b). Zakretno opterećenje intenziteta qc , koje nastaje zbog pomaka opterećenja, rastavlja se u par sila $qc/(2b)$ u ravninama pojasova.



Sl. 6. Pun gredni nabor U-presjeka opterećen u osi krutosti s prikazom unutrašnjih sila i normalnih napona

Sustav opterećenja triju diskova (sl. 6b) statički je ekvivalentan opterećenju nabora (sl. 6a), ili, drugim riječima, opterećenja diskova jesu komponente opterećenja nabora.

Za neku udaljenost c opterećenja od hrpta dobiva se jednolika raspodjela normalnih napona po širini pojasova. Pojasovi su tada središnje opterećeni na vlak, odnosno tlak, a hrbat, zbog simetrije poprečnog presjeka nabora i antisimetrije opterećenja, na savijanje bez uzdužne sile. Neutralna ravnina poklapa se s ravninom simetrije tako da je nabor napregnut na pravo savijanje. Tada nema torzije.

Moment inercije površine poprečnog presjeka nabora sastoji se iz doprinosa hrpta i pojasova, pa iznosi

$$I = \frac{2}{3} F b^2 + 2 F b^2 = \frac{8}{3} F b^2. \quad (3)$$

Normalni naponi odrede se primjenom obrazaca za pravo savijanje (sl. 6c). Vlačna sila donjeg pojasu i tlačna sila gornjeg pojasu određene su umnoškom normalnog napona i površine poprečnog presjeka pojasu, $\frac{3}{8} \frac{M}{b}$, gdje je M moment savijanja u promatranom presjeku.

Na sl. 6d vidi se u ravninu prevallen isječak nabora od krajnje dijafragme do poprečnog presjeka u kojemu je gredna poprečna sila jednaka nuli, a gredni moment savijanja maksimalan. Pojasovi i hrbat su odvojeni. Hrbat djeluje na pojasove, a pojasovi na hrbat silom smicanja

$$T = \frac{3}{8} \frac{M}{b}, \quad (4)$$

koja je jednaka uzdužnoj sili u pojasovima. Uvjet da pojasovi ne budu savijani može se napisati u obliku

$$T \frac{b}{2} = M \frac{c}{2b}. \quad (5)$$

Iz (5) i (6) dobiva se da je udaljenost ravnine opterećenja od ravnine hrpta

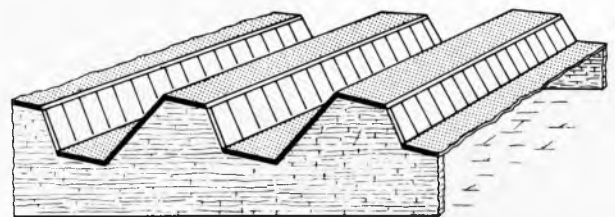
$$c = \frac{3}{8} b. \quad (6)$$

Kružićem označena točka (sl. 6a) na simetrali presjeka na udaljenosti c od hrpta jest središte smicanja poprečnog presjeka nabora. Os kroz središte smicanja koja je okomita na poprečni presjek, jest os krutosti nabora. Poprečna opterećenja koja djeluju u osi krutosti savijaju, ali ne zakreću nabor.

U promatranom primjeru ravnina opterećenja okomita je na ravninu simetrije, pa se nabor savija paralelno ravnini opterećenja.

Usporedbom se rezultata dobivenih za dva položaja opterećenja pokazuje da se, paralelnim pomakom opterećenja u os krutosti nabora, ekstremne vrijednosti normalnih napona smanje na 7/16 od onih vrijednosti koje se dobivaju uz jednako opterećenje u ravnini hrpta. Pomakom opterećenja ujedno se eliminira torzija, a zbog toga i izvitoperenje poprečnih presjeka, tako da su i deformacije nabora mnogo povoljnije.

Z-nabori su nabori u obliku slova Z. Z-nabori često se primjenjuju za hale s prirodnom rasvjetom sa sjeverne strane (sl. 7). Naborani elementi u poprečnom smjeru djeluju kao proste ploče s obostranim prepustima. Proračun, odnosno dimenzioniranje ploče provodi se, kao što je uobičajeno za armirani beton, na osnovi isječka ploče širokog 1 m. U uzdužnom su smjeru naborani elementi proste grede.



Sl. 7. Isječak krovne konstrukcije hale s prirodnom rasvjetom sa sjeverne strane

U Z-presjeku (sl. 8a) poklapaju se težište i središte smicanja. Poprečna opterećenja koja prolaze kroz os krutosti savijaju ali ne zakreću nabor. Naponi se određuju primjenom nauke o čvrstoći; pri tom se ne smije zaboraviti da osi x , y nisu glavne osi poprečnog presjeka.

Momenti inercije za smjerove x i y te devijacijski moment za te smjerove poprečnog presjeka iznose:

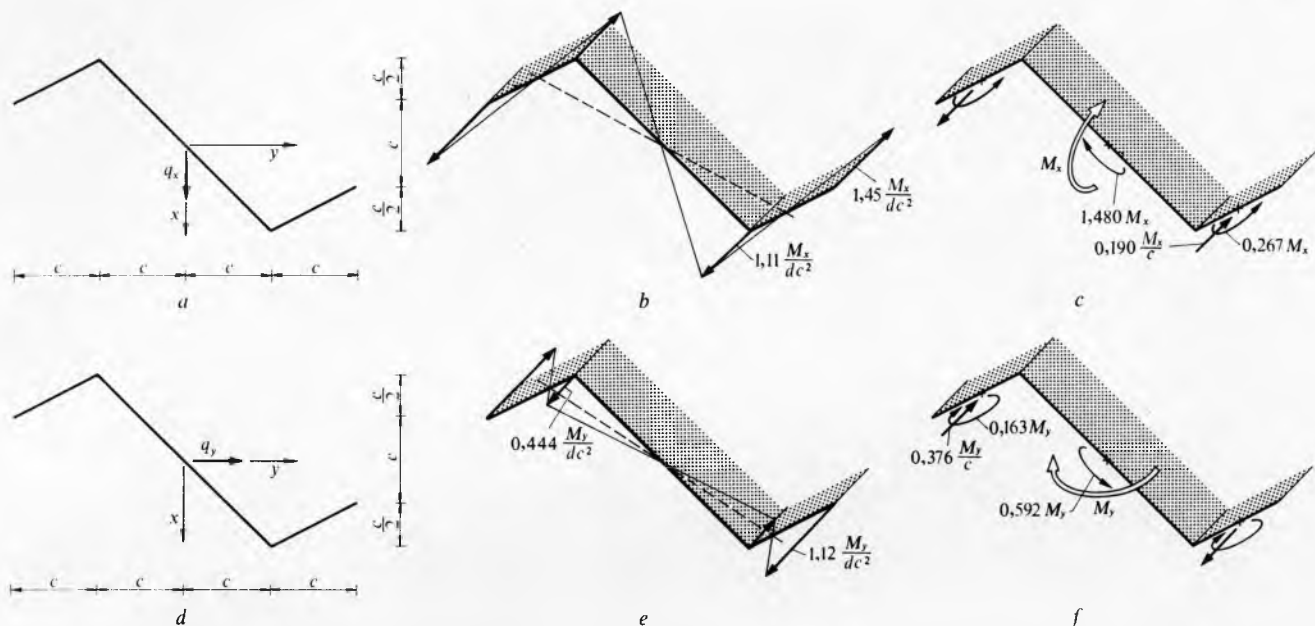
$$I_x = 2,247 d c^3, \quad I_y = 6,160 d c^3, \quad I_{xy} = 3,366 d c^3, \quad (7)$$

gdje je d debljina stijenke, a c polovica tlocrtne duljine (sl. 8a).

Vlastita težina i snijeg na cijeloj površini nabora daju vertikalno opterećenje q_x (sl. 8a) na jedinicu duljine nabora. Iz tog opterećenja proistječu gredni momenti savijanja M_x u vertikalnoj ravnini kroz os krutosti nabora.

Normalni naponi u poprečnim presjecima nabora određeni su izrazom za koso savijanje:

$$\sigma = \frac{I_y x - I_{xy} y}{I_x I_y - I_{xy}^2} M_x, \quad (8)$$



Sl. 8. Pun gredni nabor Z-presjeka s prikazom normalnih napona i unutrašnjih sila. a, b, c utjecaj vertikalnog opterećenja; d, e, f utjecaj horizontalnog opterećenja

gdje su x i y koordinate točke u kojoj djeluje napon σ , a moment M_x odnosi se na poprečni presjek koji se ispituje. Ako je proračunata vrijednost napona pozitivna, napon je vlačan. Na dijagramu normalnog napona (sl. 8b) isprekidanom linijom označena je nullinija normalnog napona, tj. neutralna os poprečnog presjeka. Ravnina određena neutralnom i uzdužnom osi nabora jest neutralna ravnina nabora.

Na osnovi utvrđenih vrijednosti normalnih napona mogu se odrediti membranske unutrašnje sile (sl. 8c). Unutrašnji disk, hrbat, opterećen je na savijanje, gornji pojas na ekscentrično zatezanje, a donji pojas na ekscentrični pritisak. Uzdužne sile i momenti savijanja triju diskova ovise o grednom momentu savijanja M_x .

Sile koje nastaju pri potresu u uzdužnom smjeru hale daju poprečno horizontalno opterećenje q_y (sl. 8d) na jedinicu dužine nabora. Djelovanjem toga opterećenja pojavljuju se gredni momenti savijanja M_y u horizontalnoj ravnini kroz os krutosti nabora. Normalni naponi u poprečnim presjecima nabora iznose:

$$\sigma = \frac{I_x y - I_{xy} x}{I_x I_y - I_{xy}^2} M_y. \quad (9)$$

Pozitivnim vrijednostima napona odgovaraju vlačni naponi. Na dijagramu normalnog napona (sl. 8e) isprekidana linija jest neutralna os poprečnog presjeka.

Pomoću normalnih napona odrede se membranske unutrašnje sile (sl. 8f). Hrbat je napregnut na savijanje, a pojasovi na ekscentrični pritisak, odnosno ekscentrično zatezanje. Sustav uzdužnih sila i momenata savijanja triju diskova statički je ekvivalentan grednom momentu savijanja M_y .

Pri superpoziciji utjecaja nekoliko opterećenja treba, dakako, uzeti u obzir da sile potresa mogu djelovati ne samo slijeva udesno nego i zdesna ulijevo. Unutrašnje sile koje nastaju djelovanjem horizontalnih opterećenja treba uvijek uzeti u račun s oba, odnosno s nepovoljnijim predznakom.

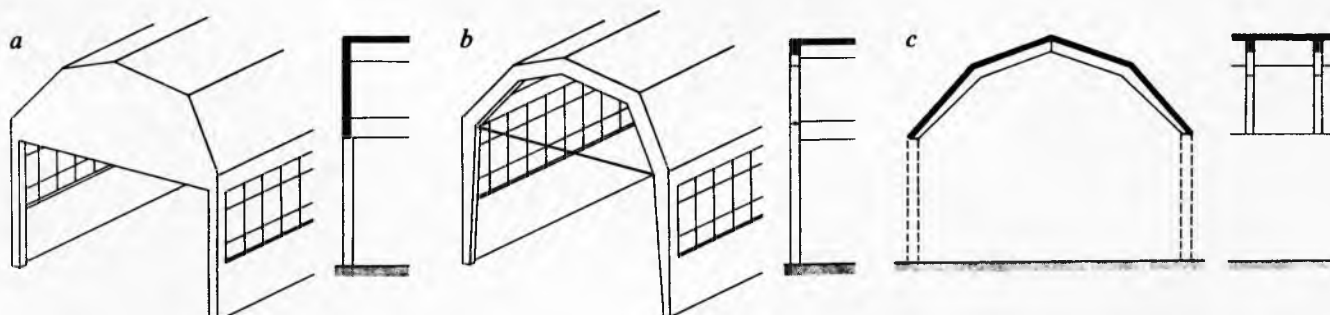
Djelovanjem obaju promatranih opterećenja nabor se koso savija. On se progiba okomito na neutralnu ravninu, pa se ravnina progibanja ne poklapa s ravninom opterećenja.

Bačvasti nabori. Jednopoljni bačvasti nabori imaju tendenciju, kao i jednopoljne bačvaste ljuske, da se pod utjecajem vertikalnog opterećenja u poprečnom smjeru skupe i time promijene oblik poprečnog presjeka. Bočni pomaci bridova rastu od nule uz dijafragme do najvećih vrijednosti u polovištu raspona. Najveći su bočni pomaci uzdužnih rubova nabora. Pomicanje bridova, tj. ležaja kontinuirane ploče, utječe na momente savijanja u poprečnom smjeru nabora. Negativni momenti savijanja povećavaju se u ležajnim područjima, a pozitivni momenti savijanja smanjuju se u poljima. Pod nepovoljnim okolnostima mogu pozitivni momenti savijanja potpuno nestati, a ležajni momenti savijanja toliko porasti da postanu mnogo veći nego kad su bridovi nepomični. Tada je cijela gornja površina nabora zategnuta, a to je nepovoljno i sa stajališta vodonepropusnosti konstrukcije.

Bačvasti nabori prenose opterećenje, npr., na pune dijafragme (sl. 9a) ili na dvozglobne okvire sa zategom (sl. 9b).

Sastoji li se krov od više bačvastih nabora poprečno nanižanih jedan do drugoga, mogu se skupiti, dakako, samo vanjske polovice rubnih nabora.

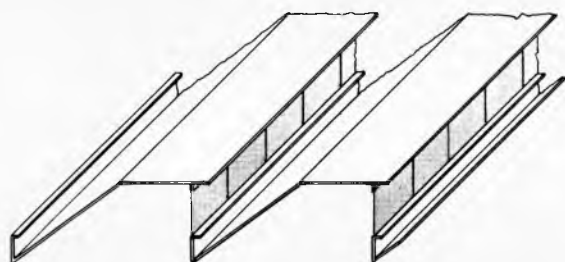
Da se eliminiira ili svede na minimum nepovoljni utjecaj poprečnog skupljanja, bačvasti se nabori ukružuju sekundarnim



Sl. 9. Isječci bačvastih nabora. a i b ležajne konstrukcije, c sekundarne dijafragme

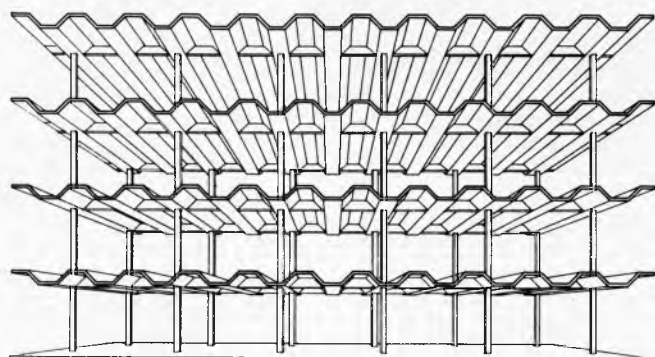
dijafragmama. Pod sekundarnim dijafragmama podrazumijevaju se dijafragme koje poprečno ukrčuju konstrukciju, ali ne preuzimaju i ne prenose opterećenje. One se najčešće izvode kao poprečna rebra (sl. 9c), a eventualno i kao poprečne razupore. S. Rao je pokazao da je djelovanje sekundarnih dijafragmi u relativno kratkim naborima djelotvornije nego u relativno dugima. Sekundarne dijafragme, međutim, znatno otežavaju gradnju, pa se od njih često odustaje.

Bačvasti nabori primjenjuju se i za hale s prirodnom rasvjetom sa sjeverne strane (sl. 10). Naborani elementi, odvojeni svjetlosnim trakama, mogu se shvatiti kao varijanta nazupčanih (shed) ljuski. Moment otpora poprečnog presjeka u smjeru najmanje krutosti relativno je malen, pa ta varijanta, kao i shed-ljuska, nije ekonomična.



Sl. 10. Isječak krovne konstrukcije hale s prirodnom rasvjetom sa sjeverne strane

Primjeri upotrebe. Krov i stropovi Candeline škole u Mexico Cityju (sl. 11) izvedeni su kao koritasti nabori. U svom uzdužnom smjeru nabori su proste grede s obostranim prepustima. Dijafragme su kontinuirane grede koje akcije nabora prenose na stupove. Kako površina nabora nije ravna, potrebne su sekundarne ploče. Tako nastaju dodatni troškovi, pa je svrsishodnost takvih nabora za stropne konstrukcije problematična.



Sl. 11. Nosiva konstrukcija Candeline škole u Mexico Cityju

Glavnu nosivu konstrukciju hale na sl. 12 čine dvopoljni okviri. Stupovi se stanjuju prema dolje tako da se spoj stupova i temelja može smatrati zglobnim. Krovna je ploča prelomljena, pa uzduž hale, tj. u smjeru okomitom na okvire, djeluje kao nabor. U varijanti na lijevoj strani crteža svaka se polovica gornje ploče može smatrati upetom na tri, a slobodnom na četvrtoj strani. Krovne ploče, međutim, imaju još jednu funkciju: one daju prečki okvira pritisnut pojas. U varijanti na lijevoj strani crteža ploča u polju i ploče u području čvorova odvojene su svjetlosnim trakama, a u varijanti na desnoj strani ploča iz pritisnutog područja u polju prelazi u pritisnuto područje uz čvorove.



Sl. 12. Poprečni presjek dvobrodne hale

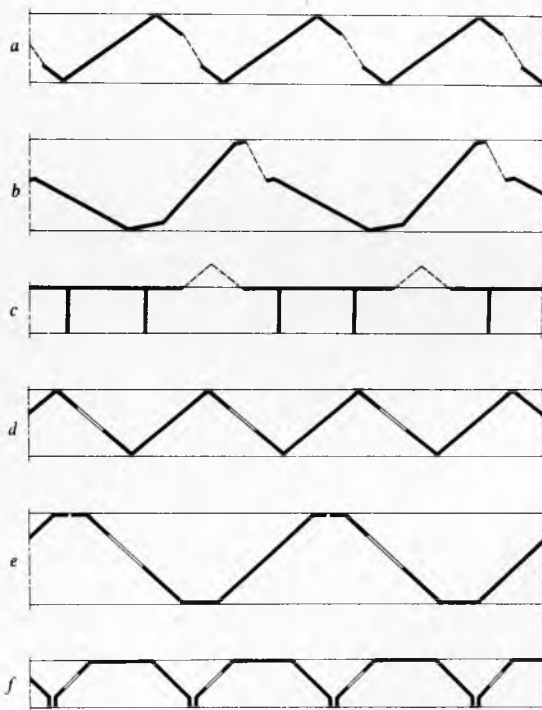
Naborane konstrukcije primjenjuju se i pri gradnji spremišta materijala, bunkera i sl.

Pretfabricirani naborani elementi. Razvoju pretfabriciranih naboranih elemenata mnogo su doprinijeli T. Koncz i H. Rühle.

Za krovove i stropove do raspona ~30 m primjenjuju se elementi u obliku slova T i TT, a za krovove također koritasti elementi, te elementi u obliku slova Z i V. Pretfabricirani naborani elementi većih raspona često su prethodno prednapregnuti. Visina poprečnog presjeka nabora najčešće iznosi $1/15 \dots 1/30$ raspona, dok je debljina obično 5...10 cm. Naborani elementi koji se prevoze kamionima ne smiju biti širi od 2,5 m ni dulji od 25 m.

Nadsvjetla se mogu smjestiti između susjednih Z-elemenata (sl. 13a), susjednih koritastih elemenata (sl. 13b) i susjednih TT-elemenata (sl. 13c). Kad su krovovi od V-elemenata (sl. 13d) i od koritastih elemenata (sl. 13e i f), nadsvjetla se mogu ostvariti i otvorima u jednom od diskova elementa.

Između naboranih elemenata ostavljaju se pri montaži nekoliko centimetara široke fuge. Povoljno je ako iz uzdužnih rubova naboranih elemenata strše tanke čelične šipke. Te se šipke povežu s uzdužnom šipkom, a fuge se zaliju cementnim mortom. Tako su elementi povezani u više-manje monolitnu cjelinu.



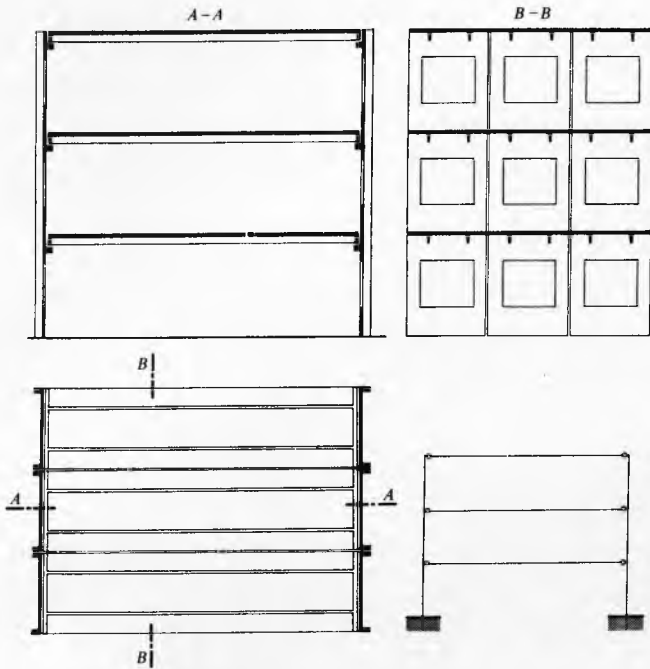
Sl. 13. Pretfabricirani gredni naborani elementi. a, b, c sa svjetlosnim trakama između elemenata; d, e, f sa svjetlosnim trakama u disku

Ponekad se pretfabriciraju ne samo horizontalni nego i vertikalni elementi nosive konstrukcije. Tako se, npr., fasade zgrada mogu izvesti od trokatnih pretfabriciranih zidnih elemenata U-presjeka širine 1,5...3,0 m (sl. 14); zbog svoje naboranosti takvi elementi preuzimaju ne samo vertikalno nego i horizontalno opterećenje. Montaža se može pojednostavniti i ubrzati primjenom pretfabriciranih okvirnih elemenata (sl. 15).

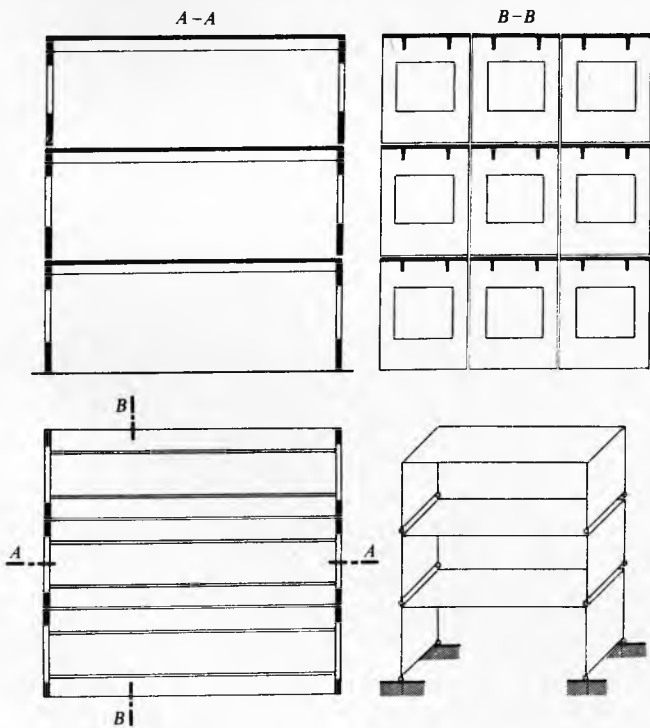
PUNI GREDNI CIKCAK-NABORI

Cikcak-nabori najčešće su primjenjivani prizmatični gredni nabori. Dobivaju se nizanem V-elemenata u poprečnom smjeru, a konstruktivno su povoljni, ekonomični i atraktivni (sl. 16).

Najpovoljniji nagib ravninskih elemenata nabora iznosi ~35°. Konstrukcije s mnogo strmijim ili mnogo položitim elementima mnogo su skuplje. Kad se primjenjuju cikcak-nabori, sekundarne dijafragme obično nisu potrebne.

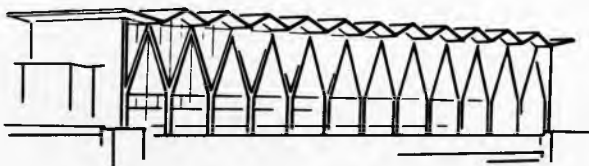


Sl. 14. Poprečni i uzdužni presjek, tlocrt i mehanička shema nosive konstrukcije isječka trokatne upravne zgrade od pretfabriciranih zidnih i stropnih elemenata.



Sl. 15. Poprečni i uzdužni presjek, tlocrt i mehanička shema nosive konstrukcije isječka trokatne upravne zgrade od pretfabriciranih okvirnih elemenata

Unutrašnje sile, dimenzioniranje i armatura. Da se odrede unutrašnje sile, promatra se isječak poprečnog presjeka cikcak-nabora i pripadna opterećenja (sl. 17a). Pri tom je g vlastita težina po jedinici kose površine, a p težina snijega po jedinici



Sl. 16. Nosiva konstrukcija hale hidroelektrane Birsfelden na Rajni

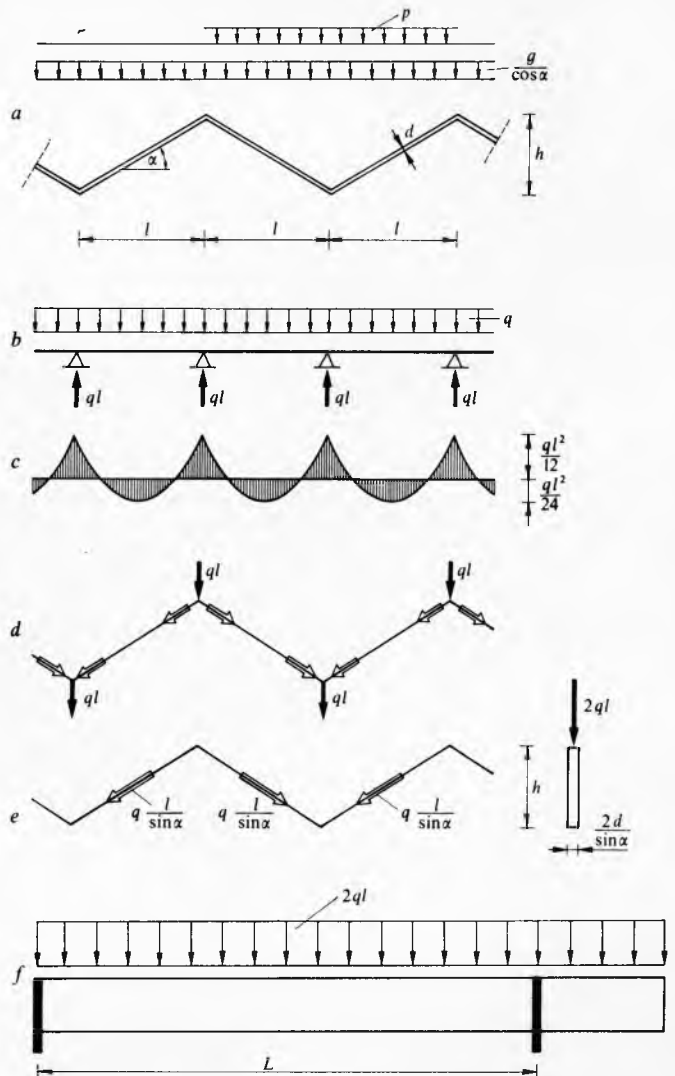
tlocrtne površine nabora. Kako je vlastita težina najčešće mnogo veća od težine snijega, analiza se, radi jednostavnosti, često provodi za ukupno opterećenje koje po jedinici tlocrtne površine iznosi

$$q = \frac{g}{\cos \alpha} + p. \quad (10)$$

Unutrašnje sile u poprečnom smjeru nabora pronalaze se ispitivanjem isječka kontinuirane ploče širine 1 m (sl. 17b); rasponi ploče određeni su tlocrtnim razmakom uzdužnih bridova nabora. Opterećenje ploče iznosi q po jedinici duljine. Ako ploča ima mnogo polja, a rasponi su jednaki ili približno jednaki, mjerodavni momenti ploče približno su jednaki momentima obostrano upete jednodopoljne ploče (sl. 17c), pa u unutrašnjim poljima iznose $ql^2/24$, a nad unutrašnjim ležajima $-ql^2/12$. Uzme li se u obzir redistribucija unutrašnjih sila zbog puzanja betona, za momente u poljima može se prihvatiti vrijednost $ql^2/16$, a za ležajne $-ql^2/16$.

Ležaji na prijelomima ploče koji su pretpostavljeni pri određivanju unutrašnjih sila u poprečnom smjeru nabora zapravo ne postoje. Prema tome treba akcije s vrijednošću ql na zamišljene ležaje rastaviti u smjerove susjednih diskova (sl. 17d). Superpozicijom akcija na sljemenima i u uvalama dobivaju se rezultatna opterećenja diskova $ql/\sin \alpha$ (sl. 17e). Sustav tih rezultatnih opterećenja statički je ekvivalentan opterećenju nabora, pa su ona usmjerena prema dolje. Diskovi svoja opterećenja prenose na dijafragme.

Da se pojednostavni pronalazanje membranskih unutrašnjih sila, presjek, oblika slova V, dvaju susjednih nagnutih diskova,

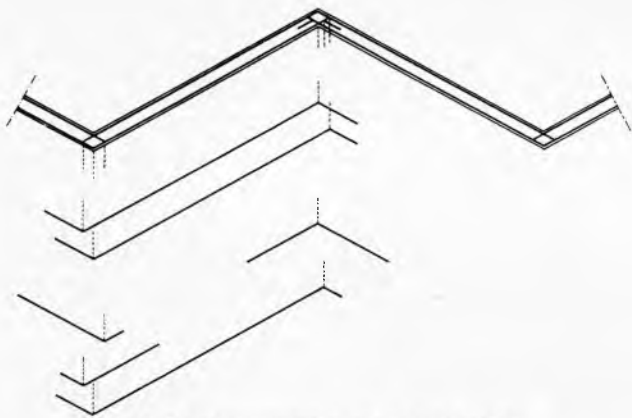


Sl. 17. Uz određivanje unutrašnjih sila cikcak-nabora

zamijeni se ekvivalentnim pravokutnim presjekom (sl. 17e desno). Širina ekvivalentnog presjeka određena je dvostrukom horizontalnom projekcijom debljine diskova, a njegova visina jednaka je visini nabora. Opterećenje ekvivalentne grede iznosi $2ql$ po jedinici duljine. U primjeru na sl. 17f greda je oslonjena na dvije dijafragme te ima jedan prepušt.

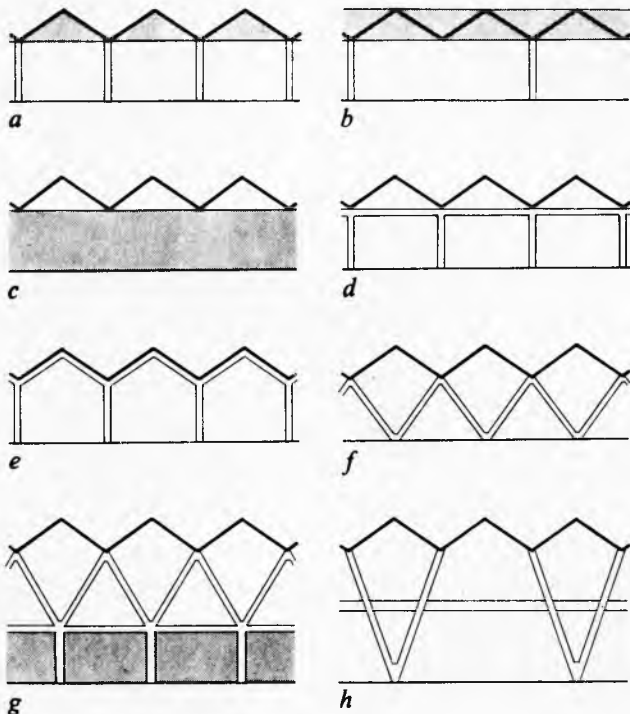
Greda se dimenzionira kao što je uobičajeno za grede od armiranog betona.

U skladu s dvojakim prijenosom opterećenja nabora potrebna je i dvostruka armatura. Za preuzimanje vlačnih naprezanja zbog djelovanja momenata savijanja u poprečnom smjeru nabora stavlja se poprečna armatura (sl. 18). Uzdužnom arma-



Sl. 18. Poprečna armatura grednog cikcak-nabora

turom preuzimaju se vlačna naprezanja zbog djelovanja momenata savijanja u uzdužnom smjeru nabora i kosa glavna naprezanja. Dispozicija uzdužne armature odgovara uobičajenim dispozicijama glavne armature armiranobetonskih greda; specifičnost je samo u tome što je širina poprečnih presjeka diskova vrlo malena u usporedbi s njihovom visinom. Ako je potrebno šipke sastaviti, zbog premalih raspoloživih duljina, treba paziti da međusobni razmaci šipki u području sastavka ne budu premali. Sastavke susjednih šipki treba razmaknuti. Sastavljanje je šipki zavarivanjem, s obzirom na potrebni prostor, najpovoljnije, ali iziskuje agregat za zavarivanje, a i

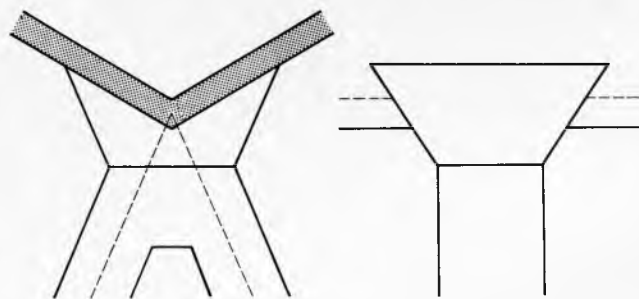


Sl. 19. Ležajne konstrukcije grednih cikcak-nabora

ugrađivanje armature otežano je zbog velikih duljina sastavljenih šipki.

Ležajne konstrukcije. Naborani elementi mogu biti oslonjeni na trokutne dijafragme (sl. 19a). Diskovi nabora, međutim, svoje akcije uglavnom neposredno predaju stupovima. Kose se akcije dvaju susjednih diskova superponiraju nad glavama stupova u vertikalne rezultante. Ako svaki drugi V-element nema vlastitog stupa (sl. 19b), ležajne akcije tih elemenata preuzima dijafragma i prenosi ih na stupove. Dijafragma je prosta ili kontinuirana greda opterećena svojom težinom i, u polovištu raspona, ležajnom akcijom V-elemenata. Nabore manjih raspona moguće je osloniti i neposredno na uzdužne zidove (sl. 19c), ili na okvire s horizontalnom prečkom (sl. 19d). Tada je spljoštenje nabora spriječeno horizontalnim pridržanjem njegovih najnižih točaka u ravni fasade. Prečke okvira ne moraju biti krute na savijanje; one mogu biti i zgloбно pričvršćene na stupove. Nabor se može osloniti i na trapezne okvire (sl. 19e). Stupovi mogu biti kosi tako da formiraju niz trokuta (sl. 19f). Tada su glave stupova u ravni fasada horizontalno nepomične, tako da dijafragme nisu potrebne ako je raspon nabora umjeren. Parovi stupova formiraju V-elemente, pa se nazivaju viljuškastim stupovima. Ponekad su nabori oslonjeni na Y-stupove (sl. 19g). I tada se glave stupova mogu smatrati horizontalno nepomičnima. Ako nabor u svakom drugom polju naliježe na viljuškast stup (sl. 19h), svaki krak viljuškastog stupa, tj. svaki kosi stup, prima vertikalnu akciju jednog V-elementa nabora. Stupovi su u ravni fasade bočno pridržani kranskom stazom. Bez tog pridržanja oni bi bili bočno suviše fleksibilni; glave stupova se, međutim, ne mogu smatrati bočno nepomičnima.

Dakako da postoji mnogo drugih mogućnosti za oblikovanje dijafragma, odnosno za oslanjanje nabora. Nabor se može osloniti, npr., na visoke armiranobetonske rešetkaste nosače, pa je tada broj stupova smanjen na minimum.



Sl. 20. Kapitel za povećanje kontaktne površine nabora i stupa

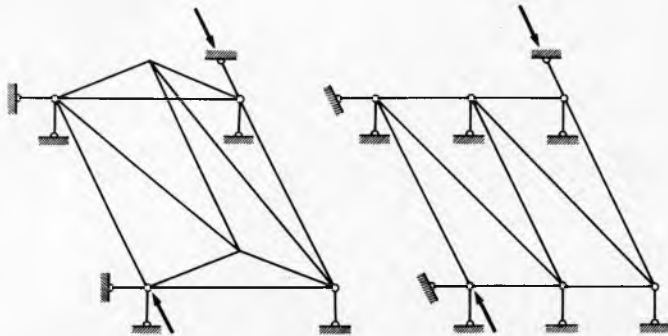
Ako se nabor oslanja neposredno na stupove, tj. bez posredovanja dijafragmi, u područjima nabora oko glava stupova nastaju veliki kosi vlačni naponi. Radi se, slično kao u plosnatim stropovima, o problemu proboja ploče. Da ti vlačni naponi ne dostignu prevelike vrijednosti, kontaktna površina između stupova i nabora povećava se umetanjem kapitela, tzv. gljiva (sl. 20).

Prijenos horizontalnih opterećenja. Ako su stupovi u uzdužnim fasadama zgrade jaki, oni, djelujući kao konzole upete u temelj, preuzimaju ukupno opterećenje vjetrom na te fasade. Ako stupovi uzdužnih fasada, međutim, ne mogu preuzeti ukupno opterećenje vjetrom, dio opterećenja koje otpada na gornji dio, otprilike na gornju polovicu, uzdužnih fasada preuzima krovni nosač od nabora i dijafragmi, odnosno od prečki koje zamjenjuju dijafragme (sl. 19a, b, c, d). Dijafragme, odnosno prečke čine pojasove, a nabor hrbat toga nosača, koji opterećenje prenosi na bočne zidove ili ukrućenja u bočnim fasadama zgrade. Pojasovi su pritisnuti na strani zgrade izloženoj pritisku vjetra, a na drugoj strani zategnuti. Sile u pojasovima određene su kvocijentom momenta savijanja u promatranom presjeku i međusobne udaljenosti pojasova, odnosno širine hale.

Ako nabor naliježe na trapezne okvire, viljuškaste ili Y-stupove (sl. 19e, f, g, h), pojasne sile, odnosno sile dobivene rastavljanjem

momenata savijanja na par sila, preuzimaju ti okviri, odnosno stupovi, i prenose ih na tlo.

H. Strohmeier je pokazao na ekvivalentnom modelu (sl. 21) da naborana ploča preuzima poprečne sile kao da nije naborana. Diskovi nabora rade na smicanje u svojoj ravnini; naponi smicanja određeni su poprečnom silom nosača u promatranom presjeku.

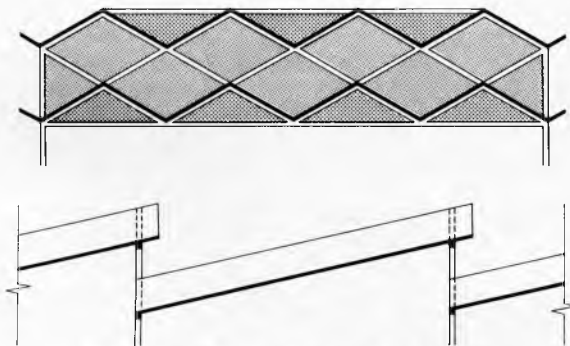


Sl. 21. Uz prijenos poprečnih sila koje nastaju djelovanjem vjetra na uzdužne fasade

Dok se opterećenje vjetrom ostvaruje pritiskom na jednoj i podtlakom na drugoj strani zgrade, seizmičko se opterećenje ostvaruje ubrzanjem masa, pa nastaje tamo gdje se mase nalaze, tj. na koti krova. Seizmičko opterećenje preuzima krovni nosač od nabora i dijafragmi, kao što je već spomenuto, i prenosi ga na bočne zidove ili ukrućenja u bočnim fasadama.

Pri potresu u uzdužnom smjeru hale seizmičko opterećenje preuzimaju naborani V-elementi i prenose ga na uzdužne fasade. Tamo ga prihvaćaju stupovi ili okviri i prenose ga na tlo.

Varijanta cikcak-nabora. M. Hanna i A. Farad razradili su varijantu cikcak-nabora za hale s prirodnom rasvjetom sa sjeverne strane (sl. 22). U toj varijanti naborani V-elementi ne



Sl. 22. Jedna od varijanti grednog cikcak-nabora

premošćuju halu u njenu poprečnom smjeru, kako je to uobičajeno, nego su orijentirani uzduž hale. Oslonjeni su na rešetkaste nosače s rombičnom mrežom koji stoje na stupovima u uzdužnim fasadama hale. Nabori su u uzdužnom smjeru hale nagnuti, pa se u ravninama rešetkastih nosača, između nabora obaju susjednih raspona, dobivaju nadsvjetla.

PRIZMATIČNI RAŠČLANJENI GREDNI NABORI

Nabori se ponekad umjesto od punih sastavljaju od raščlanjenih, tj. rešetkastih, ravninskih elemenata. Građevni je materijal čelik, aluminij ili drvo. Za projektiranje raščlanjenih nabora u principu vrijede već spomenute smjernice.

U-nabori. Raščlanjeni U-nabor (sl. 23) sastoji se od jedne hrptne i dviju pojasnih rešetki, odnosno, točnije, od četiri pojasa koji su štapovima ispunjene povezani u prostornu rešetku. Širina nabora označi se sa b , a njegova visina neka je $2b$. Ako se ispita utjecaj opterećenja q u ravnini hrpta (sl. 23a), utvrdit će se da ukupno opterećenje preuzima hrptna rešetka, a pojasne

rešetke ostaju nenapregnute. Gredni moment savijanja M rastavi se u par sila, i to u sile $M/(2b)$ u gornjem i donjem pojasu hrptne rešetke. U područjima pozitivnih grednih momenata savijanja gornji je pojas pritisnut, a donji zategnut (sl. 23b). Sile u štapovima ispunje hrptne rešetke određene su pomoću gredne poprečne sile. Za dimenzioniranje pojasova mjerodavne su ekstremne vrijednosti grednih momenata savijanja, a za dimenzioniranje štapova ispunje ekstremne vrijednosti ležajnih grednih poprečnih sila. Pojasne rešetke uz promatrano opterećenje ostaju nenapregnute, ali doprinose stabilnosti pojasova hrptne rešetke. Točnije, pojasne rešetke bočno pridržavaju pojasove hrptne rešetke i sprečavaju izvijanje iz ravnine hrpta.

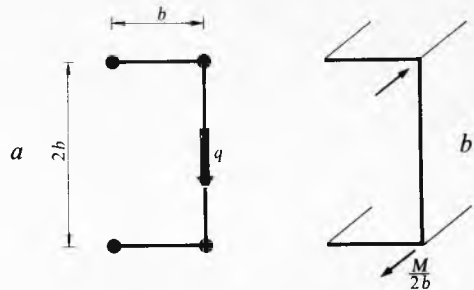
Nabor se progiba u vertikalnoj ravnini; ako je prosta greda, a opterećenje jednoliko raspodijeljeno uzduž raspona, ekstremna je vrijednost progiba u polovitu raspona

$$\Delta = \frac{5}{384} \frac{q L^4}{EI_x} = \frac{5}{48} \frac{M L^2}{EI_x} \quad (11)$$

Gredni se moment savijanja M odnosi na polovište raspona. Moment inercije poprečnog presjeka nabora za savijanje u vertikalnoj ravnini, jer rubni pojasovi ne sudjeluju u prijenosu opterećenja, iznosi

$$I_x = 2 F b^2 \quad (12)$$

gdje je F površina poprečnog presjeka pojasa hrptne rešetke.



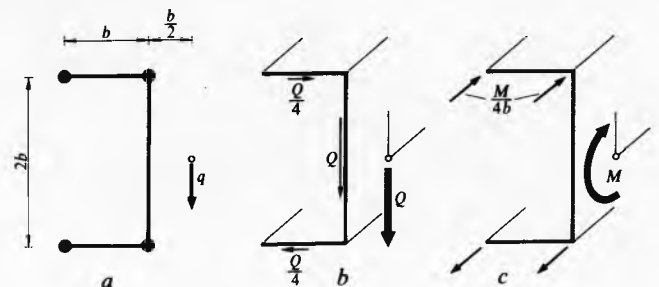
Sl. 23. Raščlanjen gredni nabor U-presjeka opterećen u ravnini hrpta uz prikaz pojasnih sila

Ako se nabor umjesto u ravnini hrpta preko poprečnih konzola optereti paralelno hrptu, aktiviraju se pojasne rešetke, pa je stanje napona povoljnije. Optereti li se nabor u udaljenosti $b/2$ od hrpta (sl. 24a), sile $M/(2b)$ koje se dobiju rastavljanjem grednog momenta savijanja M u par sila (sl. 24c) podijele se po pola, na oba gornja odnosno oba donja pojasa.

Poprečne sile triju rešetki nabora mogu se odrediti sljedećim postupkom. Zamisli se da je gredna poprečna sila Q premještena iz ravnine opterećenja nabora u ravninu hrpta. Torzijski moment $Qb/2$ koji nastaje zbog tog premještanja rastavi se u par sila $Q/4$ u ravninama pojasova (sl. 24b). Sustav poprečnih sila $Q/4$, Q i $Q/4$ triju rešetki statički je ekvivalentan grednoj poprečnoj sili Q u ravnini opterećenja nabora. Drugim riječima, poprečne su sile triju rešetki komponente gredne poprečne sile.

Pojasni štapovi dimenzioniraju se na osnovi ekstremnih vrijednosti grednog momenta savijanja, a štapovi ispunje na osnovi ekstremnih vrijednosti poprečne sile promatrane rešetke.

Hvatište opterećenja na sl. 24a naziva se središtem smicanja poprečnog presjeka nabora.



Sl. 24. Raščlanjen gredni nabor U-presjeka opterećen u osi krutosti uz prikaz unutrašnjih sila

Unutrašnje sile nabora mogu se odrediti i drugačije. Opterećenje q nabora (sl. 24a) rastavi se na komponente $q/4$, q i $q/4$ u ravninama njegovih triju rešetki, a onda se proračunaju sile u štapovima rešetki. Sile u pojasovima koji su zajednički hrptnoj i jednoj od pojasnih rešetki dobivaju se superpozicijom, dakle zbrajanjem, uzimajući u obzir i predznak doprinosa obiju rešetki. Rezultati su, dakako, identični s već spomenutima.

Nabor se progiba vertikalno. Ako je nabor prosta greda, a opterećenje jednoliko raspodijeljeno uzduž raspona, za maksimalni progib u polovištu raspona opet vrijedi izraz (11). Tada je, međutim, moment inercije, jer su aktivni svi pojasovi, dva puta veći od vrijednosti prema jednadžbi (12).

Z-nabori. Raščlanjeni Z-nabor sastoji se od jedne hrptne i dviju pojasnih rešetki, odnosno točnije, od četiri pojasa koji su štapovima ispunje povezani u prostornu rešetku. U raščlanjenom Z-presjeku težište i središte smicanja koincidiraju kao i u punom Z-presjeku.

Na nabor djeluje središnje opterećenje intenziteta q_x (sl. 25a), koje je sastavljeno od vlastite težine i težine snijega. Opterećenje q_x uzduž raspona je konstantno.

Da se odrede unutrašnje sile, opterećenje q_x rastavi se pomoću poligona sila u tri komponente u ravninama rešetki, tj. u opterećenja rešetki. Ta opterećenja daju poprečne sile i momente savijanja rešetki; iz poprečnih sila odrede se sile u štapovima ispunje, a iz momenata savijanja sile u pojasovima rešetki. Sile u unutrašnjim pojasovima nabora, dakle u pojasovima koji su zajednički hrptnoj i jednoj od pojasnih rešetki, dobivaju se superpozicijom doprinosa obiju susjednih rešetki.

Umjesto da se opterećenje nabora rastavi u opterećenja rešetki i njima proračunaju poprečne sile i momenti savijanja rešetki, mogu se iz opterećenja q_x nabora odrediti gredne poprečne sile Q_x i gredni momenti savijanja M_x , te njih rastaviti u poprečne sile (sl. 25b) i momente savijanja rešetki. Sile u pojasovima dobivaju se rastavljanjem momenata savijanja rešetki u par sila (sl. 25c). Sustav sila u pojasovima statički je ekvivalentan grednom momentu savijanja.

Dok je za puni Z-nabor rastavljanje grednog momenta savijanja u unutrašnje sile hrpta i pojasova bilo statički neodređeno, za raščlanjeni Z-nabor ono je statički određeno.

Pojasovi i štapovi ispunje dimenzioniraju se kao što je uobičajeno u čeličnim, odnosno drvenim konstrukcijama. Pri dimenzioniranju pritisnutih štapova treba uzeti u obzir i opasnost od izvijanja.

Sile u štapovima Z-nabora mogu se odrediti i primjenom tehničke teorije savijanja. Budući da x , y nisu glavne osi poprečnog

presjeka, savijanje je koso. Momenti inercije poprečnog presjeka nabora za smjerove x i y te devijacijski moment za te smjerove iznose

$$I_x = 2,5F'c^2, \quad I_y = 10F'c^2, \quad I_{xy} = 4F'c^2, \quad (13)$$

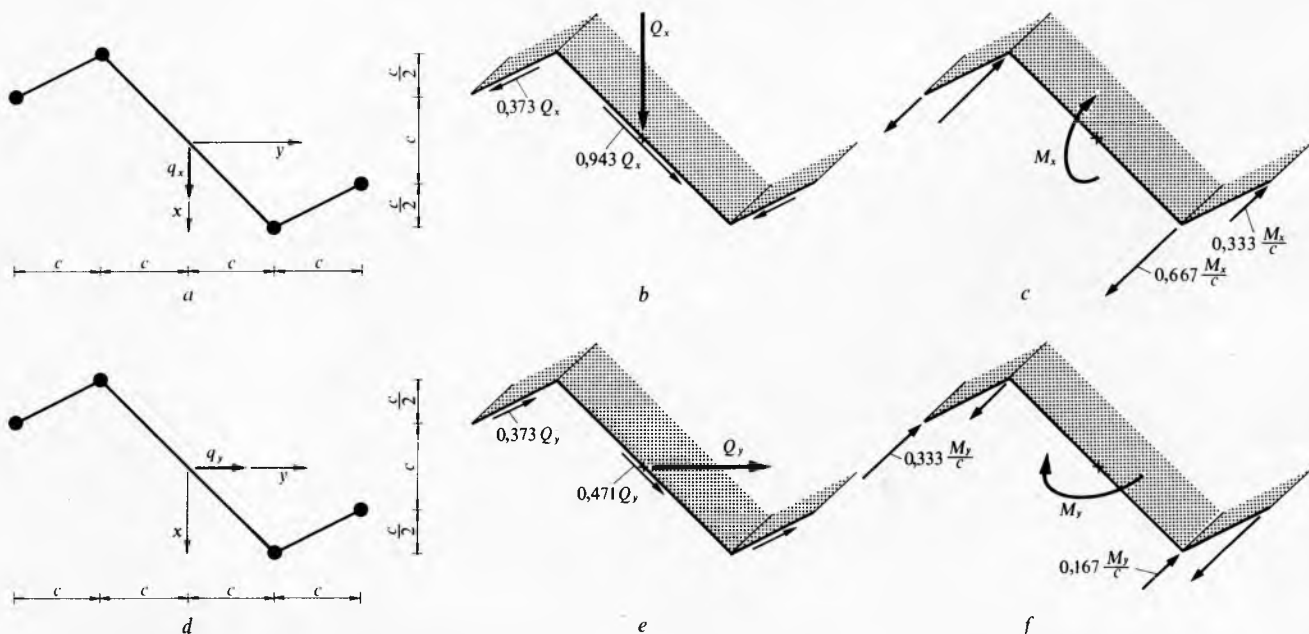
gdje je F' površina poprečnog presjeka jednog od pojasova. Normalni naponi pojasova mogu se odrediti pomoću izraza (8); pomnože li se naponi s površinom pojasa F' , opet se dobiju sile u pojasovima prikazane na sl. 25c. Analogno se odrede i poprečne sile rešetki; rezultati su identični s vrijednostima na sl. 25b koje su određene na drugi način.

Nabor se progiba okomito na neutralnu ravninu, dakle u ravnini koja se ne poklapa s ravninom opterećenja. Pri projektiranju može biti potrebno kontrolirati vertikalnu komponentu maksimalne vrijednosti progiba. Ona se može odrediti pomoću izraza (11) ako se umjesto momenta inercije I_x za vertikalni smjer uvede smanjena vrijednost $(I_x I_y - I_{xy}^2)/I_y$. Pomak poprečnog presjeka nabora može se protumačiti kako slijedi. Tri rešetke nabora progibaju se djelovanjem svojih opterećenja svaka u svojoj ravnini. U čvorovima se progibi obiju priključenih rešetki superponiraju tako da su projekcije pomaka čvora na ravnine rešetki jednake progibu promatrane rešetke. Rešetke se progibaju, dakle, i okomito na svoju ravninu.

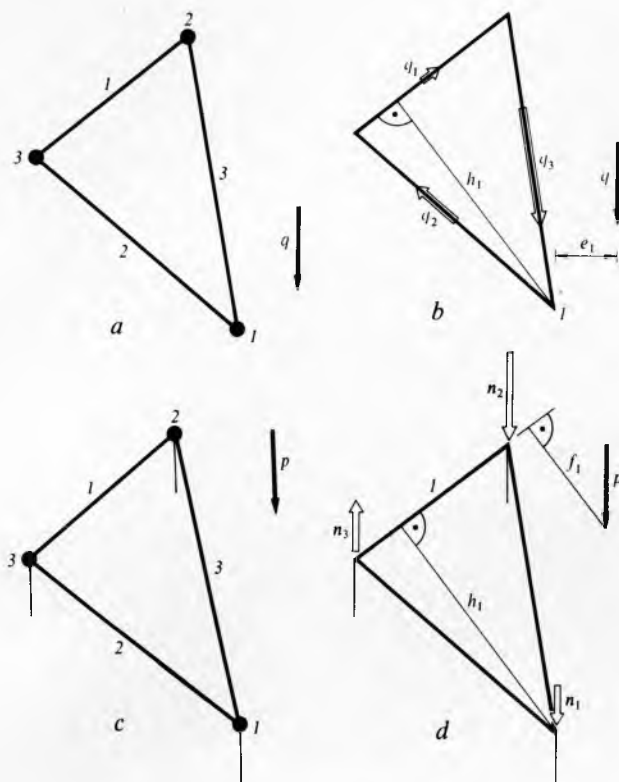
Utjecaj horizontalnog opterećenja q_y (sl. 25d), koje nastaje, npr., djelovanjem potresa u uzdužnom smjeru hale, može se ispitati analogno. Štapovi ispunje dimenzioniraju se na osnovi poprečne sile (sl. 25e) odnosno rešetke, a pojasovi na osnovi odnosne pojasne sile (sl. 25f). Sustav triju poprečnih sila statički je ekvivalentan grednoj poprečnoj sili Q_y , a sustav pojasnih sila grednom momentu savijanja M_y .

Trokutni nabori. Nabori su zatvorenoga, npr. trokutnoga, poprečnog presjeka u usporedbi s naborima otvorenoga poprečnog presjeka torzijski vrlo kruti. Zbog svoje znatne torzijske krutosti nabori zatvorenoga poprečnog presjeka podesni su, npr., za glavne nosače krovišta hangara. Oni nose na objema stranama isturene konzolne nabore, a svoje akcije predaju stupovima ili zidovima na bočnim krajevima hangara. Ako je krov opterećen snijegom samo s jedne strane glavnog nosača, dakle na jednoj polovici tlocrta, ležajni momenti obaju konzolnih nabora samo se djelimično uravnotežuju, a razlika ležajnih momenata prenosi se u glavni nosač kao zakretno opterećenje. Glavni je nosač opterećen ne samo na savijanje nego i na torziju.

Poprečno opterećenje q uzduž raspona (sl. 26a) uvodi se u nabor preko poprečnih konzola ili okvira. Da se odrede unutrašnje sile, opterećenje q nabora rastavi se u opterećenja



Sl. 25. Raščlanjen gredni nabor Z-presjeka s unutrašnjim silama. a, b, c utjecaj vertikalnog opterećenja; d, e, f utjecaj horizontalnog opterećenja



Sl. 26. Trokutani nabor i unutrašnje sile. a, b utjecaj poprečnog opterećenja; c, d utjecaj uzdužnog opterećenja

q_1, q_2, q_3 njegovih rešetki 1, 2 i 3 (sl. 26b). Rastavljanje je najjednostavnije primjenom Ritterova postupka, pa se dobiva

$$q_1 = \frac{e_1}{h_1} q, \quad q_2 = \frac{e_2}{h_2} q, \quad q_3 = \frac{e_3}{h_3} q, \quad (14)$$

gdje je e_1 udaljenost ravnine opterećenja nabora, a h_1 udaljenost rešetke 1 od pojasa 1 koji je nasuprot te rešetke. Udaljenosti e_2, h_2, e_3, h_3 definirane su analogno. Napišu li se jednadžbe (14) u obliku $q_i h_i = e_i q$, za $i = 1, 2, 3$, one prikazuju statičku ekvivalentnost sustava opterećenja rešetki q_1, q_2, q_3 i opterećenja q nabora. Opterećenja rešetki mogu se, dakle, shvatiti kao komponente opterećenja nabora.

Nakon što su određena opterećenja rešetki, svaka se rešetka analizira na uobičajeni način. Sile u štapovima ispune slijede iz poprečne sile rešetke. Sile u pojascima triju rešetki dobiju se rastavljanjem momenta savijanja rešetke na par sila. Kako su pojasci zajednički dvjema rešetkama, definitivne vrijednosti sila u pojascima dobiju se superpozicijom doprinosa obiju susjednih rešetki.

Za dimenzioniranje pojascova mjerodavne su ekstremne vrijednosti sile u pojascu, a one su određene ekstremnim vrijednostima grednog momenta savijanja. Za proste grede mjerodavan je, dakle, presjek u polovištu raspona, a za kontinuirane grede jednakih ili približno jednakih raspona presjek nad prvim unutrašnjim ležajem. Najnepovoljnije opterećeni štapovi ispune nalaze se neposredno uz ležaje, lijevo ili desno od njih.

Pomak nekog poprečnog presjeka nabora jednoznačno je određen pomacima triju rešetki u njihovim ravninama.

Razmatran je utjecaj poprečnih opterećenja tj. opterećenja okomitih na uzdužnu os nabora. Ponekad se, međutim, pojavljuju opterećenja koja su paralelna uzdužnoj osi nabora (sl. 26c). Tako su, npr., vertikalni nabori zgrada težinom stropova i korisnim teretom opterećeni paralelno svojoj uzdužnoj osi.

Opterećenje p rastavi se u tri komponente (sl. 26d) u osima pojascova, pa su komponente

$$n_1 = \frac{f_1}{h_1} p, \quad n_2 = \frac{f_2}{h_2} p, \quad n_3 = \frac{f_3}{h_3} p, \quad (15)$$

gdje je f_1 udaljenost linije opterećenja od rešetke 1 nasuprot

pojasu 1. Udaljenosti f_2 i f_3 definirane su analogno. Pojasci 1 i 2 su pritisnuti, a pojas 3 je zategnut.

Utjecaj uzdužnih opterećenja u ostalim poprečnim presjecima nabora ispituje se analogno. Konačne vrijednosti sila u pojascima dobiju se superpozicijom doprinosa pojedinih opterećenja. Štapovi ispune pri uzdužnom opterećenju nabora ostaju nenapregnuti.

PRIZMATIČNI GREDNI NABORI OD ČELIČNIH POJASOVA I TRAPEZNIH LIMOVA

Gredni cikcak-nabori mogu se izvesti i od čeličnih pojascova i trapeznih limova (sl. 27). Prijenos opterećenja u tom sustavu može se vrlo pojednostavnjeno zamisliti prema sljedećoj shemi. Opterećenje preuzimaju trapezni limovi i prenose ga na pojaseve, a pojasci na zabate. Limovi pri tom djeluju kao profilirane jednosmjerne ploče; tlocrtni raspon ploče jednak je tlocrtnom razmaku pojascova. Pojasci djeluju kao grede; raspon grede jednak je razmaku dijafragmi. Konstrukcije projektirane na osnovi takve pojednostavljene sheme su, međutim, neekonomične.

Detaljna ispitivanja pokazala su da trapezni limovi ne djeluju samo kao ploče nego da, osim toga, rade na smicanje povezujući oba pojasa, na koje su priključeni, u kosi disk. Pojasci zbog toga nisu napregnuti na savijanje nego momente savijanja diska preuzimaju aksijalnim silama pritiska, odnosno zatezanja. Limovi preuzimaju poprečne sile diska. Prijenos vlastite težine i snijega u promatranom sustavu, prema tome, analogan je prijenosu vjtra na uzdužne fasade u konstrukcijama od punih cikcak-nabora i dijafragmi.

Po dva susjedna diska formiraju jedan naborani element V-presjeka. Naborani elementi djeluju kao grede koje u svojoj ravnini simetrije preuzimaju vertikalno opterećenje nad pripadnim dijelom tlocrta. Pojasci u uvalama, u području pozitivnih grednih momenata savijanja, napregnuti su na vlak, a sljemeni pojasci na pritisak. Izvijanje pritisnutih pojascova nije moguće jer su oni bočno pridržani trapeznim limovima.

Za unutrašnja polja nabora dobivaju se ekstremne vrijednosti sila u gornjem i u donjem pojascu,

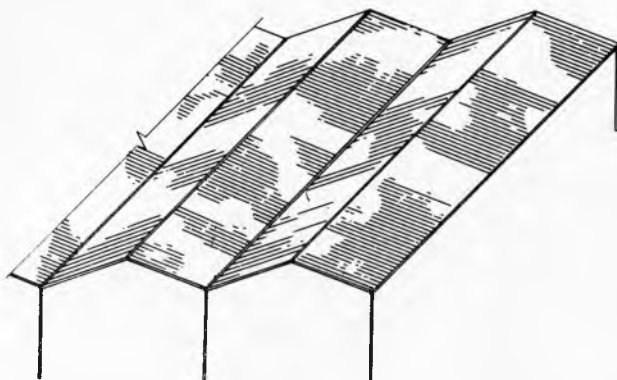
$$O = U = q l L^2 / 4 \quad (16)$$

One se, dakako, odnose na presjek u polovištu raspona. Ekstremna vrijednost toka smicanja, dakle sile smicanja po jedinici dužine, trapeznih limova iznosi

$$T' = \frac{q l L}{2 \sin \alpha} \quad (17)$$

Ona se pojavljuje uz ležaje nabora, tj. uz dijafragme.

Pojasci su od valjanih profila ili zatvorenih profila savijenih od ravnih limova. Uobičajene debljine trapeznih limova jesu ~ 1 mm; u ležajnim područjima, tj. uz dijafragme, gdje je naprezanje najveće, limovi su ponekad nešto deblji, $\sim 1,2$ mm. Najčešće su veće visine trapeza ekonomičnije od većih debljina lima. Kako bi se izbjeglo lokalno izbočenje lima, razmak bridova ne smije biti prevelik, nikako ne veći od 10 cm. Tra-



Sl. 27. Isječak hale s krovnom konstrukcijom od cikcak-nabora od čeličnih pojascova i trapeznih limova (dijafragme nisu prikazane)

pezni limovi pričvršćuju se na pojasove pomoću vijaka ili zakovica; da bi veza bila dovoljno kruta, na svakoj kontaktnoj površini između dvaju susjednih bridova lima treba predvidjeti dva vijka, odnosno dvije zakovice. Trapezni se limovi i pojasovi mogu spojiti i zavarivanjem.

Označi li se površina poprečnog presjeka pojasa sa F' , moment inercije poprečnog presjeka V-elementa nabora iznosi $F'h^2/2$. Maksimalna vrijednost progiba u polovici raspona iznosi

$$\Delta = \frac{5}{96} \frac{qL^4}{EF'h^2} \quad (18)$$

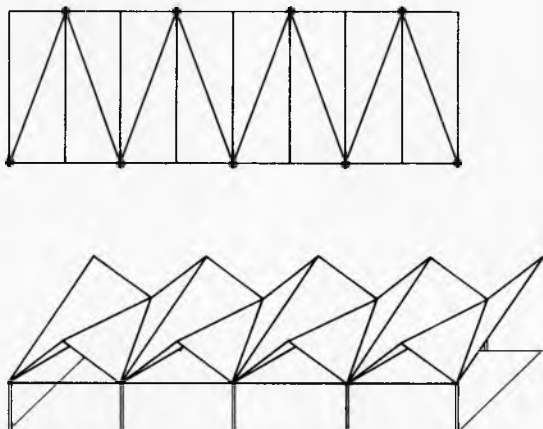
Izraz (18) daje doprinos savijanja, a tome doprinosu treba dodati doprinos smicanja. On je, međutim, obično malen, pa se može zanemariti.

R. Lawson je opisani nabor primijenio za različite hale te školske i druge zgrade raspona do 30 m, a J. Falkenberg ga preporuča čak za raspone do 45 m.

OSTALE VRSTE NABORA

Aprizmatični gredni nabori. H. Engel predložio je mnogo geometrijski interesantnih aprizmatičnih grednih nabora.

Prijenos opterećenja u aprizmatičnim grednim naborima, kao i u prizmatičnim grednim naborima, jest dvojak. Opterećenje se najprije prenosi u smjeru okomitom na raspon nabora na uzdužne bridove. Ravninski elementi nabora pri tom djeluju kao ploče. Na bridovima se akcije ploča rastavljaju u smjerove susjednih ravninskih elemenata koji, djelujući tada kao diskovi, prenose opterećenje uzduž raspona na dijafragme. Prema tome, i u aprizmatičnim grednim naborima postoje dvije grupe unutrašnjih sila: unutrašnje sile u poprečnom smjeru nabora i membranske unutrašnje sile.



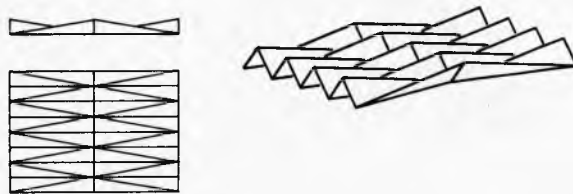
Sl. 28. Tloctrt i aksonometrija hale s krovnom konstrukcijom od koničnih naboranih elemenata

Vrlo atraktivne krovne konstrukcije hala mogu se dobiti primjenom koničnih naboranih elemenata (sl. 28). Naborani elementi sastavljeni su od dva pravokutna trokuta, te su svojim šiljkom orijentirani neizmjenično prema jednom i drugom zabatu. Uvale krova čine nazubljenu liniju. Grebeni su paralelni bočnim fasadama zgrade, a nagnuti su naizmjenično prema jednom i drugom zabatu. Zabati su s gornje strane omeđeni nazubljenom linijom; nazubljene linije obaju zabata međusobno su pomaknute za polovicu širine zuba.

Raspon ploča promjenljiv je i u poprečnom i u uzdužnom smjeru zgrade. Za dimenzioniranje ploče mjerodavan je njen najveći raspon određen visinom trokuta od kojih su sastavljeni naborani elementi. Tloctrti raspon jednak je tloctrtom razmaku grebena krova. Moment savijanja u polovištu raspona mjerodavna je membranska unutrašnja sila, a djeluje u poprečnom presjeku koji ima najmanju visinu.

Svi elementi od kojih se krov sastoji međusobno su jednaki, pa je gradnja vrlo jednostavna. Sustav je prikladan i za gradnju od pretfabriciranih elemenata.

Sastave li se zrcalno simetrično dva opisana nabora (sl. 28), dobiva se nabor dvostruko većeg raspona (sl. 29). Grebeni u simetrali nabora paralelnoj zabatima čine nazubljenu liniju. Grebeni paralelni bočnim fasadama zgrade naizmjenično se dižu i spuštaju od zabata prema uzdužnoj simetrali krova. Nazubljene linije koje s gornje strane omeđuju zabate i nazubljena linija u simetrali nabora međusobno su pomaknute za polovicu širine zuba.

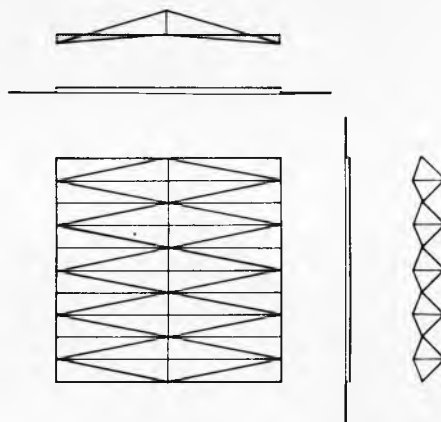


Sl. 29. Načrt, tloctrt i aksonometrija konstrukcije od aprizmatičnih grednih nabora

Za dimenzioniranje nabora prema grednom momentu savijanja mjerodavni su vanjski četvrtinski presjeci nabora. Ti presjeci imaju oblik nazubljene linije, a za proračun mogu se zamijeniti ekvivalentnim pravokutnikom. Gredni moment savijanja u tim presjecima iznosi $3/4$ njegove maksimalne vrijednosti u polovištu raspona.

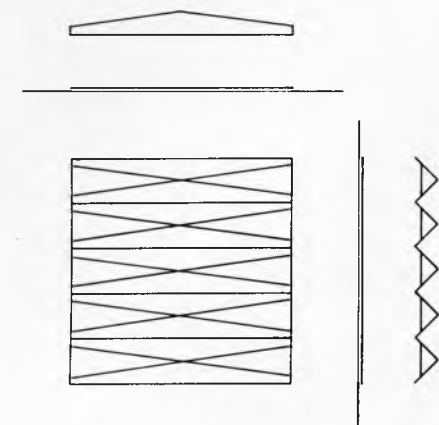
Nabori se mogu sastaviti od dviju vrsta trokuta (sl. 30); jedni su trokuti pravokutni, a drugi kosokutni, a svi se protežu do polovice širine hale. Grebeni u simetrali nabora paralelnoj zabatima čine nazubljenu liniju. Uvale nabora čine rombove prelomljene oko kraće dijagonale. U bokocrtu elementi nabora formiraju deltoide.

Maksimalni gredni moment savijanja djeluje u presjeku u kojemu je i visina poprečnog presjeka najveća, tj. u polovištu raspona, pa raspored materijala dobro odgovara stanju unutrašnjih sila. Naprezanja su povoljna.

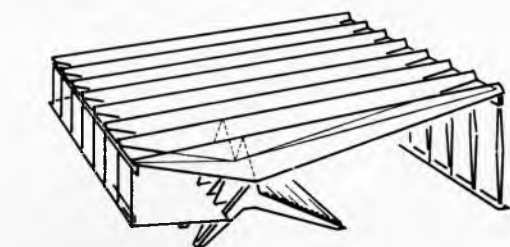


Sl. 30. Načrt, tloctrt, bokocrt i aksonometrija konstrukcije od aprizmatičnih grednih nabora sastavljenih od različitih trokuta

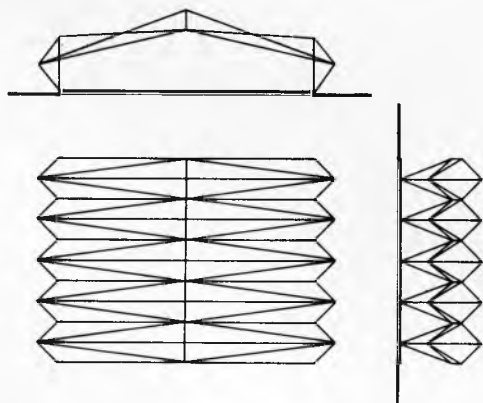
Robna kuća SADA u Milanu prekrivena je naboranim elementima sastavljenima od dvaju istokračnih trapeza i dvaju istokračnih trokuta (sl. 31). Takvi elementi ponekad se nazivaju prizmatoidima. Uvale su krova horizontalne i paralelne bočnim



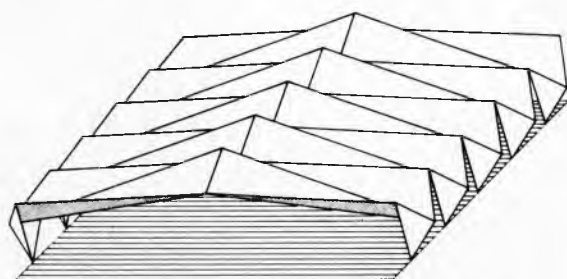
Sl. 31. Nacrt, tlocrt, bokocrt i aksonometrija grednog nabora od prizmatoidnih elemenata



Sl. 32. Nosiva konstrukcija sportske hale



Sl. 33. Nabor od dvozglonih okvirnih naboranih elemenata



fasadama zgrade. Grebeni se od trapeznih zabata dižu prema tjemenu elemenata. Elementi su prednapregnuti, njihova je duljina 25 m, širina 3,6 m, a debljina 5 cm.

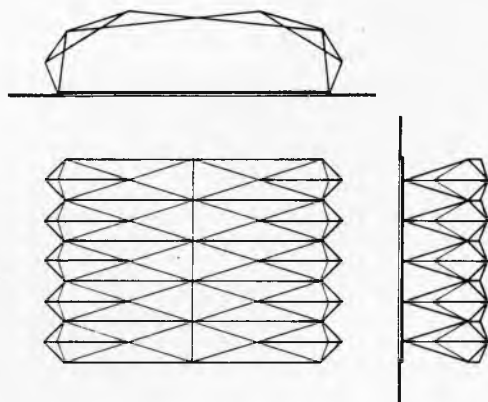
Ako su elementi oslonjeni na zabate tako da djeluju kao proste grede, trokuti koji spajaju trapeze čine pritisnut pojas.

Krovnna konstrukcija sportske hale (sl. 32) sastavljena je od koničnih elemenata koji djeluju kao greda s prepustom. Na slobodnom kraju obješena je podna ploča kancelarijskog trakta. Između koničnih elemenata nalaze se trokutne ploče. Prostorna viljuškasta konstrukcija tribine osigurava naboranim elementima ne samo vertikalno nego i horizontalno fiksne ležaje, tako da dijafragma na tom mjestu nije potrebna. Na rubu naborani elementi nalježu na grednu dijafragmu koja svoje opterećenje predaje stupovima.

Aprizmatični okvirni i lučni nabori. Naborani stupovi i naborane prečke mogu se sjediniti u naborane okvire.

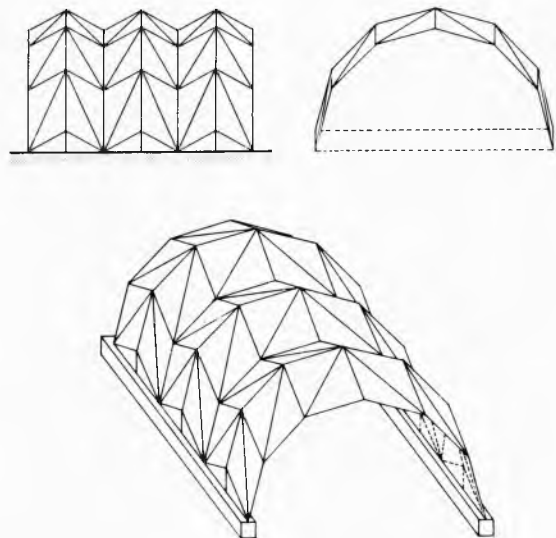
U dvozglonim okvirnim elementima (sl. 33) ekstremne vrijednosti momenta savijanja djeluju u polovištu raspona i u uglovima, u kojima je i visina presjeka najveća. U točkama na četvrtini raspona (tzv. četvrtinskim točkama) visina je presjeka najmanja, ali je tamo malen i moment savijanja. Raspodjela materijala, dakle, dobro odgovara stanju unutrašnjih sila. Kako okviri na tlo, odnosno na temelje djeluju kosim akcijama, temelje treba povezati zategom ako tlo nije dovoljno čvrsto da preuzme i horizontalne komponente akcija. Zatege se najčešće polažu u betonske kanale, tako da su zaštićene od korozije, a mogu se i prednapregnute i eventualno naknadno naprezati.

Trozglobni okvirni elementi (sl. 34) povoljniji su od dvozglonih jer su neosjetljivi na promjene temperature i eventualna nejednaka slijeganja temelja. Dilatacijske fuge, razdjelnice, nisu potrebne čak ni za vrlo duge građevine, jer su elementi zbog naboranosti u smjeru okomitom na raspon dovoljno fleksibilni. Da se spriječi spljoštenje, naborane okvire treba u uglovima ukrutiti punim ili raščlanjenim sekundarnim dijafragmama.



Sl. 34. Nabor od trozglonih okvirnih naboranih elemenata

U. Finsterwalder je cikcak-presjek, uobičajen za gredne nabore, primijenio u lukovima poštanske hale u Münchenu, raspona 150 m. Veliki raspon lukova iziskivao je velik moment otpora i velik moment inercije poprečnog presjeka. Zbog toga je dio površine presjeka koncentriran uz gornji i donji rub presjeka. Vrlo skupo betoniranje na gradilištu izbjegnuto je



Sl. 35. Bokocrt, nacrt i aksonometrija bačvasta čeličnog nabora

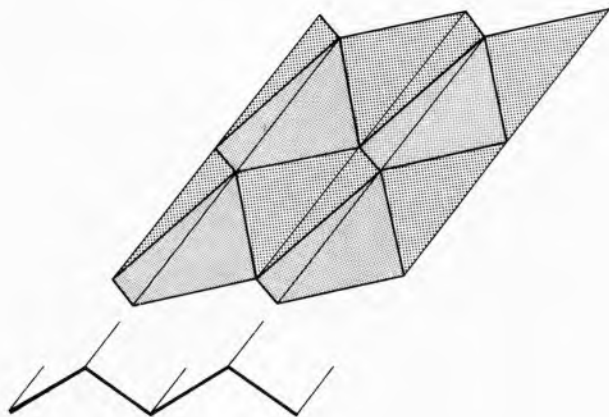
upotrebom lukova sastavljenih od pretfabriciranih dijelova u obliku slova V. Betoniranje na gradilištu bilo je potrebno samo za povezivanje pretfabriciranih dijelova. Montiran je luk po luk pomoću pomične skele.

Lukovi su zbog zakrivljenosti u svojoj ravnini relativno fleksibilni, pa se ponajviše ne suprotstavljaju promjenama temperature. Naprezanje je konstrukcije zbog promjena temperature maleno. U smjeru okomitom na raspon fleksibilnost je postignuta naboranošću, pa dilatacijske fuge nisu potrebne. Kako naponskim stanjem dominira pritisak, hidroizolacija nije bila potrebna, a moglo se odustati i od toplinske izolacije.

Čelični bačvasti nabori (sl. 35), koje je projektirao Z. Makowski, imaju visinski razmaknute susjedne štapne lukove, tako da formiraju naborane elemente V-presjeka; visina je poprečnog presjeka uzduž luka promjenljiva. Naborani elementi predstavljaju dvozglobne lukove.

Nabori od pretfabriciranih prelomljenih rombičnih dijelova. A. Koložvary je u SAD razradio univerzalno primjenljiv sustav nabora od pretfabriciranih rombičnih dijelova prelomljenih oko dulje dijagonale. Poznat je kao sustav UFP (Universal Folded Plate) i vrlo je prikladan za masovnu proizvodnju. Pretfabriciranim dijelovima samo jednog tipa mogu se, ako se različito nižu jedan do drugoga, konstruirati nabori različitih oblika, presjeka i tlocrta.

Pretfabricirani su dijelovi maleni u usporedbi s rasponom, odnosno globalnim dimenzijama nabora. Oni su od čeličnog ili aluminijskog lima. Međusobno se spajaju vijcima koji su smješteni uzduž uskih ovratnika koji omeđuju rombove. Toplinska izolacija, kad je potrebno, smješta se na donju stranu konstrukcije. Pretfabricirani dijelovi od plastičnih masa armiranih

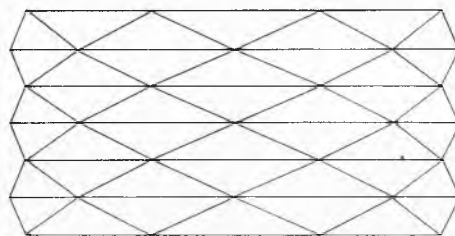
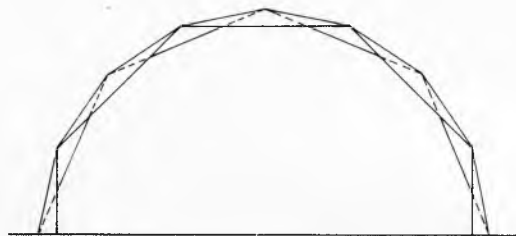


Sl. 36. Isječak grednog cikcak-nabora od UFP-dijelova

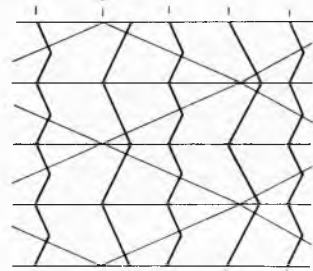
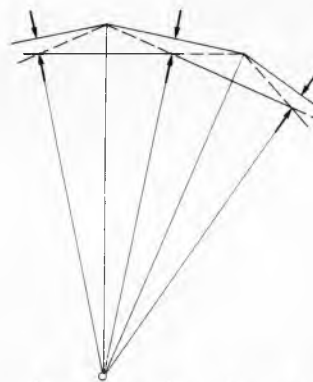
staklenim nitima i obrubljenih metalnim okvirima, koji su poznati kao elementi GRF (Glass Reinforced Plastic), lakši su od metalnih elemenata, providni su, proizvoljne boje, ne mogu korodirati, ali u pogledu čvrstoće, dakako, zaostaju za metalnim elementima.

Najjednostavnija je konstrukcija koja se može graditi prema sustavu UFP već opisani puni gredni cikcak-nabor. Rombični dijelovi nižu se jedan do drugoga tako da su po principu šahovskog polja konkavni naizmjenično prema gore i prema dolje (sl. 36), pa se sastavljanjem dobivaju koplanarne plohe.

Orijentiraju li se elementi tako da su svi konkavni prema gore, dobiva se Benjaminov bačvasti nabor (sl. 37 i 38).



Sl. 37. Bačvasti nabor od UFP-dijelova



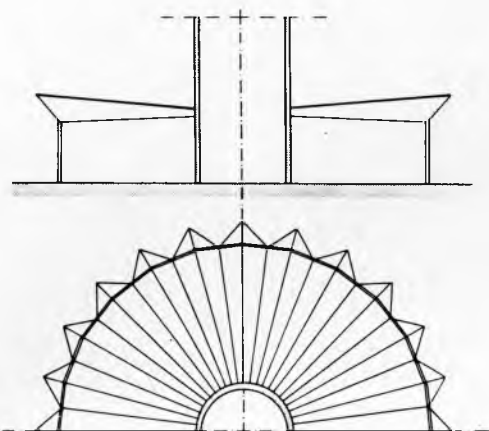
Sl. 38. Isječak nabora prema sl. 37 i karakteristični prevalljeni presjeci

Rubovi dijelova čine grebene nabora. Dijagonale dijelova paralelne su bočnim fasadama i formiraju uvale. Plohe koje se sastavljaju nisu koplanarne. Površina je poprečnog presjeka luka uzduž luka konstantna. Visina je poprečnog presjeka, međutim, promjenljiva; najmanja je u vanjskim točkama na četvrtini duljine dijelova, pa tamo momenti savijanja prouzrokuju najveće normalne napone. Nabor djeluje kao obostrano upet, tj. kao luk. Izostave li se polovični dijelovi uz donje

rubove konstrukcije, ona postaje dvozglobnim lukom. S obzirom na utjecaj promjena temperature i eventualnih nejednakih slijeganja tla zglobni luk je povoljniji od luka bez zgloba.

Nabori od lepezasto nanizanih elemenata. Aprizmatične naborane elemente moguće je nanizati lepezasto, odnosno radijalno. Tako dobiveni nabori prikladni su za kružne, prstenaste, poligonalne, trapezne, ali i za pravokutne tlocрте.

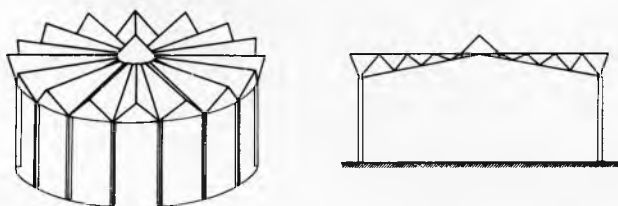
Prstenasti tlocрти mogu se prekriti koničnim grednim naboranim elementima (sl. 39). Moguće je betonirati ih na gradilištu ili konstrukciju sastaviti od pretfabriciranih, eventualno prednapregnutih, trapeznih dijelova. Na gradilištu se dijelovi povežu u cjelinu pomoću betona i čeličnih šipki koje strše iz dijelova.



Sl. 39. Krovna konstrukcija hale prstenastog tlocрта

Pri određivanju momenata savijanja u poprečnom smjeru naboranih elemenata treba računati s promjenljivošću raspona ploče. Isječci jedinične širine koji se promatraju pri proračunu jesu prstenaste kontinuirane ploče. Neće se, međutim, mnogo pogriješiti ako se kontinuirana ploča promatra kao niz obostrano upetih ploča. U radijalnom smjeru naborani elementi djeluju kao proste grede V-presjeka promjenljive širine i visine.

Kružni i poligonalni tlocрти također se mogu prekriti koničnim naboranim elementima (sl. 40) koji s unutrašnje strane naliježu na pritisnuti prsten, a s vanjske strane na stupove. Glave

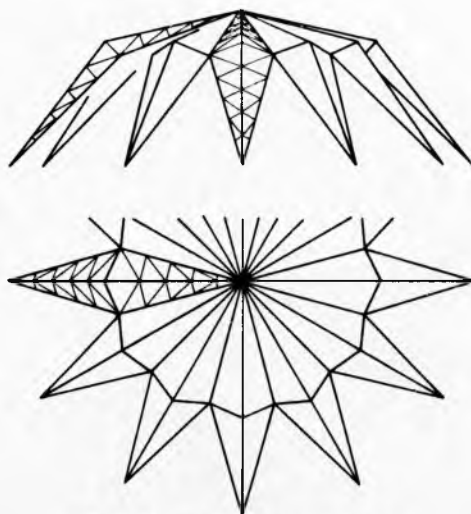


Sl. 40. Izometrija i dijametralan presjek čeličnog nabora kružnog tlocрта

stupova povezane su poligonalnom zategom. Nad pritisnutim prstenom je konično nadsvjetlo. Elementi predstavljaju grede zglobno vezane na pritisnuti prsten, horizontalno—radijalno nepomično i vertikalno pomično, a zglobno su vezane na stupove, ali u svim smjerovima nepomično. Zbog takva oslanjanja vlastita težina i snijeg stvaraju u gredi ne samo momente savijanja nego i silu pritiska. Po dva dijametralno smještena elementa čine trozgloban okvir.

B. Winn projektirao je sličan nabor od pretfabriciranih elemenata s presjekom u obliku slova W. Male i velike trokutne površine nad vlačnim prstenom naizmjenično su ostakljene. Kombinacija periferne rasvjete i središnjeg nadsvjetla osigurava odličnu raspodjelu danjeg svjetla.

U čeličnoj kupoli (sl. 41) po dva dijametralno smještena naborana elementa čine trozgloban luk. Pri simetričnom opterećenju s obzirom na vertikalnu os nabora, vlastitom težinom i snijegom na cijeloj površini kupole, lukovi ne utječu jedan

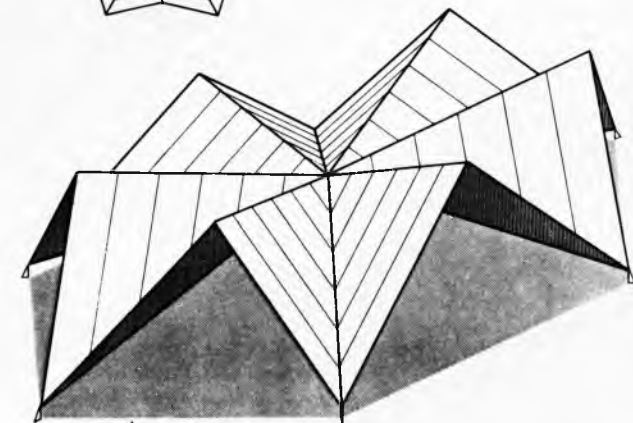
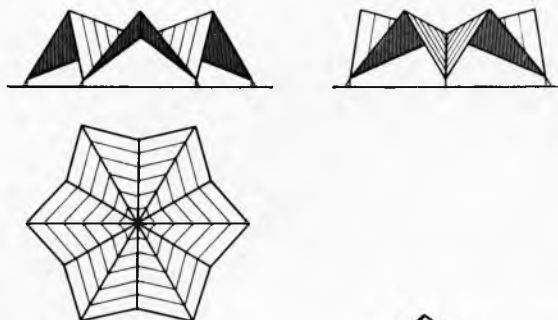


Sl. 41. Nacrt i tlocrt naborane kupole

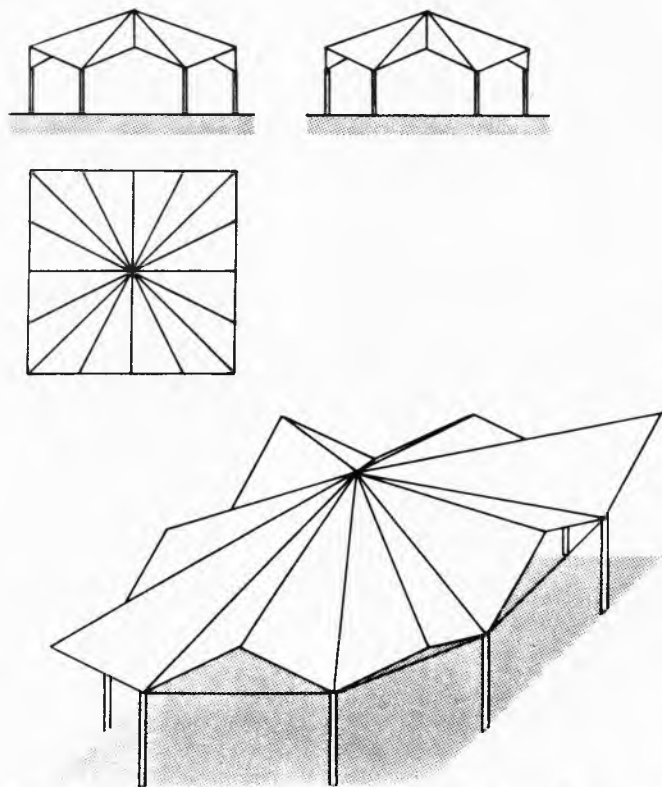
na drugoga. Proračuna se jedan luk, a rješenje vrijedi za cijeli nabor. Pretfabriciranjem naboranih elemenata može se ubrzati i pojednostiniti gradnja.

Sl. 42 prikazuje tlocrt, nacrt, bokocrt i aksonometriju nabora zvjezdolikog tlocрта. Nabor je sastavljen od jednakih trokuta. Upornjaci konstrukcije u vrhovima čine pravilni šesterokut. Po dva dijametralno smještena konična V-elementa čine trozgloban okvir. Pri opterećenju vlastitom težinom i snijegom na naboru okviru ne utječu jedan na drugoga.

Kad su tlocрти relativno malih dimenzija, obod nabora ne mora biti poduprt. Tada trokutne ploče imaju jedan slobodan rub, pa su momenti savijanja relativno veliki i zahtijevaju relativno veliku debljinu ploča. Kad su tlocрти većih dimenzija, rubovi se nabora oslanjaju na obodne okvire, zidove ili stupove. Ploče su tada oslonjene uzduž svih triju strana, momenti savijanja relativno su maleni, pa zadovoljavaju relativno male debljine. S estetskog gledišta, međutim, povoljnija je varijanta sa slobodnim obodom. Tada, naime, ostaje vidljiva debljina konstrukcije, koja je vrlo malena u usporedbi s tlocrtnim dimenzijama.



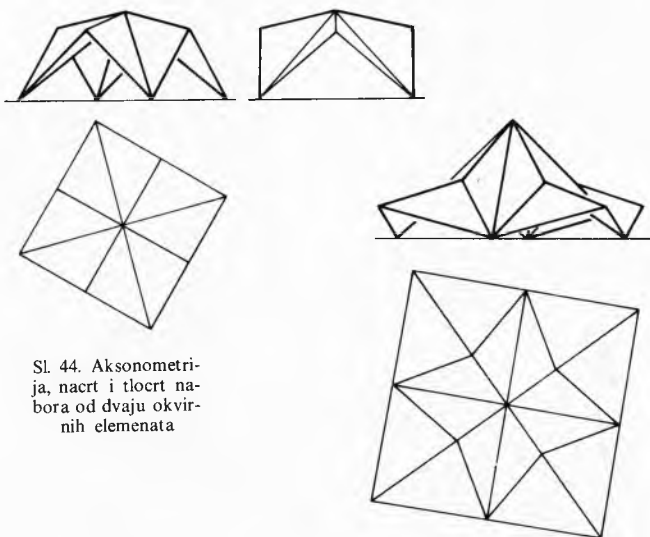
Sl. 42. Nacrt, bokocrt, tlocrt i aksonometrija nabora od okvirnih elemenata sa zvjezdolikim tlocrtnom



Sl. 43. Nacrt, bocrt, tlocrt i aksonometrija nabora od okvirnih elemenata

Sličan nabor vidi se na sl. 43. Oslonjen je na stupove u točkama na četvrtini stranica kvadratičnog tlocrta. Akcije okvira u vertikalnim ravninama kroz os nabora orijentirane su koso prema vani i naniže. Da bi stupovi bili što tanji, njihove su glave povezane zategom koja formira poligonalan vlačni prsten. Horizontalni potisci okvira koji nastaju djelovanjem vlastite težine i snijega prenose se u zategu i tamo se međusobno uravnotežuju. Tako stupovi preuzimaju samo vertikalnu komponentu akcija okvira, pa svaki stup nosi po 1/8 ukupne težine. Zategom se, međutim, ne može spriječiti prijenos horizontalnih sila, koje nastaju zbog vjetrova i potresa, na glave stupova. Stupovi prenose te sile na temelje, pa su zbog toga napregnuti na savijanje.

Dok se nabor na sl. 42 sastoji od triju, nabor na sl. 44 sastavljen je od dvaju okvirnih naboranih elemenata.

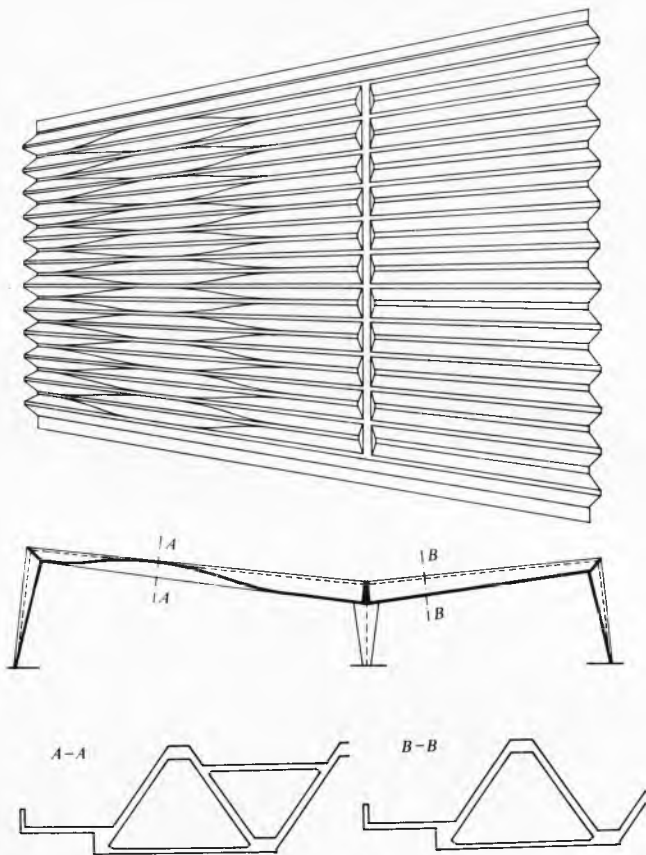


Sl. 44. Aksonometrija, nacrt i tlocrt nabora od dvaju okvirnih elemenata

Sl. 45. Nacrt i tlocrt nabora u obliku prodora dviju piramida

Nabor u obliku prodora dviju piramida (sl. 45) sastavljen je iz dvaju naboranih elemenata koji djeluju kao trozglojni okviri. Upornjaci se nalaze u polovištima stranica kvadratičnog tlocrta. Prijelomom elemenata postignuto je smanjenje raspona ploča, tako da su dovoljne relativno male debljine elemenata.

Nervijeva kongresna dvorana UNESCO u Parizu (sl. 46) sastoji se od dvopoljnih okvirnih naboranih elemenata V-presjeka.

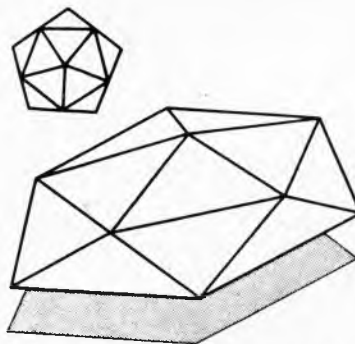


Sl. 46. Tlocrt, uzdužni presjek i dva isječka poprečnih presjeka Nervijeve kongresne dvorane UNESCO u Parizu

Stupovi se prema dolje stanjuju, tako da se njihova veza s temeljima može smatrati zglobnom. Da se pojača pritisnuto područje cikcak-nabora, dodana je ploča; ona je smještena uz uglove okvira i nad srednjim stupom na donjem rubu nabora, a u duljem je polju podignuta uz gornji rub. Poprečna ukrčenja nalaze se u uglovima okvira i nad srednjim stupom. Podizanje ploče s donjega na gornji rub nabora povoljno je i s obzirom na arhitektonsku kompoziciju unutrašnjeg prostora.

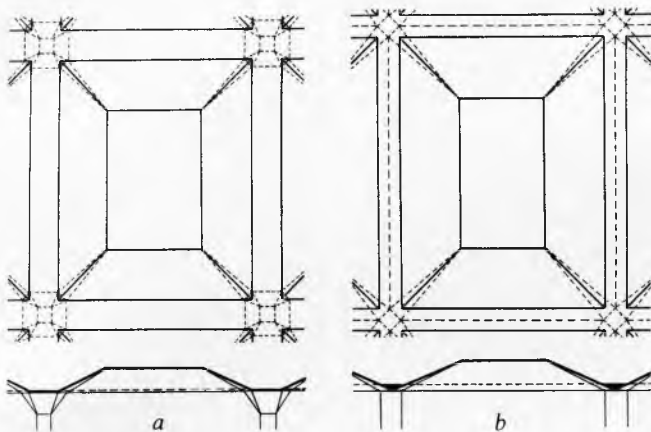
Poliedarski nabori. Poliedarski nabori često se izvode nad peterokutnima (sl. 47) i drugim mnogokutnim tlocrtima, a uzduž oboda naliježu na grede, zidove ili stupove.

Za prekrivanje velikih površina s pravilnim rasterom stupova vrlo su ekonomični nabori pravokutnog tlocrta od četiriju kosih

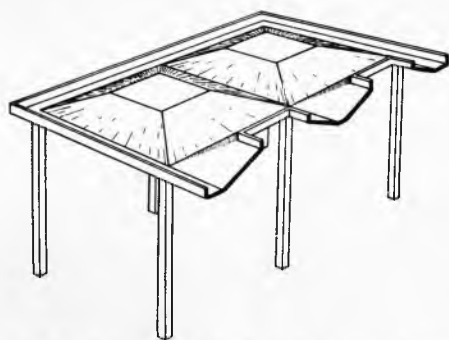


Sl. 47. Poliedarski nabor nad peterokutnim tlocrtom

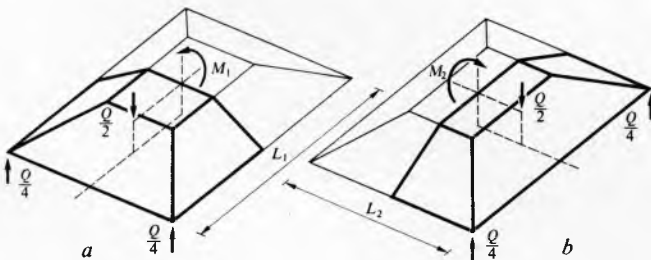
i jednoga horizontalnog ravninskog elementa. U jednoj varijanti (sl. 48 a) kosi su ravninski elementi oslonjeni na stupove preko kapitela, a između nabora su horizontalne trake. U drugoj se varijanti (sl. 48 b) kosi ravninski elementi oslanjaju na stupove bez kapitela, a pobočke su stupova zaokrenute prema horizontalnoj traci za 45° . Bridovi uzduž kojih se sastaju kosi ravninski elementi pojačani su vutama. Umjesto sljemene ploče može se staviti nadsvjetlo. Visina nabora iznosi $\sim 1/10$ srednje vrijednosti obaju raspona, debljina ravninskih elemenata ~ 10 cm, a nagib kosih elemenata ne treba da bude veći od $\sim 35^\circ$ da bi se izbjegla dvostruka oplata.



Sl. 48. Dvije varijante poliedarskog nabora nad pravokutnim tlocrtom



Sl. 49. Nabori u obliku krnjih piramida s nadsvjetlima



Sl. 50. Membranske unutrašnje sile nabora prema sl. 48.

Ako su razmaci stupova jednaki u oba smjera, nabori imaju oblik krnjih piramida (sl. 49).

Sljemeni elementi nabora djeluju, ako nisu zamijenjeni nadsvjetlima, kao dvosmjerne ploče, tj. ploče oslonjene, odnosno upete uzduž oboda, a, osim toga, u oba smjera izložene su pritisku. Kosi elementi djeluju dvojako. Preuzimajući komponentu opterećenja okomitu na svoju ravninu djeluju kao ploče oslonjene, odnosno upete uzduž oboda, a preuzimajući komponentu opterećenja u svojoj ravnini i akcije susjednih elemenata djeluju kao diskovi.

Opisani nabori nalik su na kupole, pa se nazivaju i kupolastim naborima. Krajeve konstrukcije treba ukrutiti rubnim elementima (sl. 49).

Pri određivanju membranskih unutrašnjih sila promatra se jedan nabor izoliran od drugih. Kako je konstruktivna visina uzduž sastava nabora vrlo malena, praktički nema kontinuiteta. Analizom ravnoteže polovice nabora u jednome, pa onda u drugom smjeru (sl. 50), može se pokazati da mjerodavni momenti savijanja nabora u polovištu raspona iznose.

$$M_1 = \frac{QL_1}{8}, \quad M_2 = \frac{QL_2}{8}. \quad (19)$$

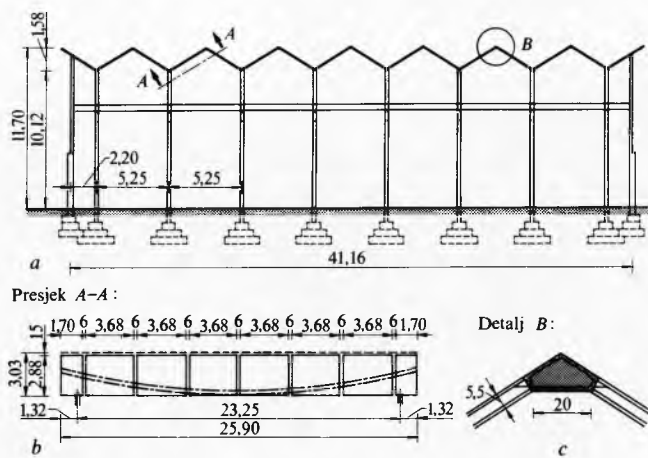
Oni se, po pola, dijele na oba kosa diska, a sljemena ploča pri tom djeluje kao pritisnut pojas. U jednadžbama (19) Q je težina jednog nabora, dok se za L_1 i L_2 kod varijante na sl. 48a uzima odgovarajući svijetli raspon nabora od ruba do ruba horizontalne trake, a kod varijante na sl. 48b odgovarajući osni razmak stupova.

Uzduž bridova između kosih elemenata prenosi se na stup po jedna četvrtina težine nabora, tako da maksimalna sila pritiska uzduž brida, nad glavom stupa, iznosi

$$N = \frac{Q}{4\sin\alpha}, \quad (20)$$

gdje je α kut nagiba brida prema horizontalnoj ravnini.

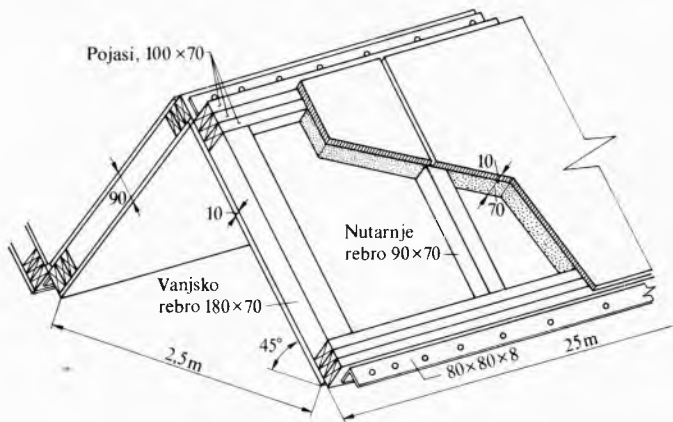
Noviji sustavi. Krovna konstrukcija hale Tehničkog univerziteta u Dresdenu (sl. 51) jest cikcak-nabor od pretfabriciranih elemenata u obliku slova V duljine 3,68 m, debljine 5,5 cm i mase 30 t. Montaža je izvršena na pomoćnoj skeli toranjskom okretnom dizalicom. Da bi se izbjegle koncentracije napona na sastavu pretfabriciranih elemenata, interpoliran je sloj cementnog morta debljine 6 cm. U kanale su uvučeni kabeli od visokovrijednog čelika. Prednaprezanjem kabela spojeno je po osam elemenata u grede s prepustima, koje po širini premošćuju halu. Sljemeni sastavi greda zatvoreni su sitnozmatim betonom ojačanim uzdužnom i poprečnom armaturom koja strši iz pretfabriciranih elemenata.



Sl. 51. Hala Tehničkog univerziteta u Dresdenu. a uzdužni presjek, b greda od osam pretfabriciranih elemenata, c detalj sastava greda

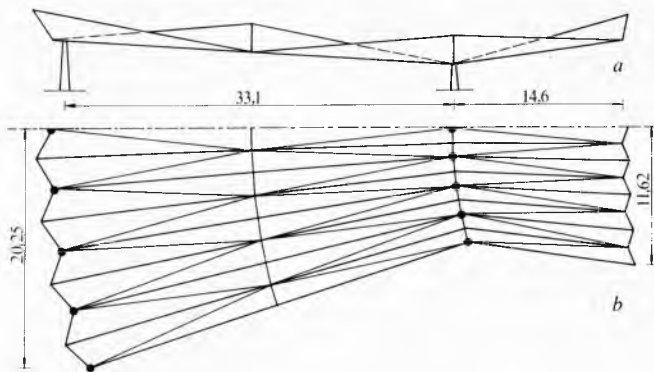
U posljednje vrijeme nabori se grade i od drvenih višeslojnih ploča sastavljenih od pojasa, rebara i šperploča (primjer na sl. 52). Pojasi su sastavljeni od nekoliko letvica ili gredica. Prostor između pojasa i rebara ispunjen je poliuretanskim ili sličnim pjenovitim masama kao toplinskom izolacijom. Svi se dijelovi međusobno spajaju lijepljenjem, eventualno pod tlakom. Uzduž raspona višeslojne ploče djeluju kao nosači. Momente savijanja tada preuzimaju pojasi, pa je sljemeni pojas pritisnut, a uvalni zategnut. Poprečne sile preuzimaju šperploče koje su napregnute na smicanje. U smjeru okomitom na raspon, dakle od sljemnog do uvalnog brida nabora, višeslojne ploče djeluju kao jednosmjerne ploče. Tada je gornja šperploča pritisnuta, donja zategnuta, a jezgra (izolacijski materijal) ako je dovoljno čvrsta, preuzima sile smicanja. Višeslojne ploče međusobno se spajaju valjanim čeličnim kutnicima. Kutnici i drveni pojasi spajaju se vijcima. Doprinos kutnika nosivosti sustava može

se uvesti u račun ako se promjer i razmak vijaka dimenzioniraju prema sili smicanja u spojnici između drvenih pojasa i kutnika.

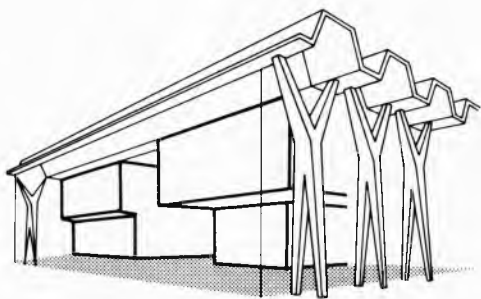


Sl. 52. Isječak nabora od drvenih višeslojnih ploča (neimenovane izmjere u milimetrima)

Hala auditorija ministarstva vanjskih poslova u Kinshasi, duljine 35 m i širine 20,5–40,5 m, premošćena je po duljini armiranobetonskim naborom koji se sastoji od trokutnih ploča debljine 15 cm (sl. 53); prepust, duljine 15 m i promjenljive širine 20–23,24 m, pokriva ulaz u halu i recepciju. Projekt je prihvaćen zbog svojih estetskih kvaliteta i povoljnih akustičnih svojstava; odvodnja kišnice ne zadaje teškoće. Krovna konstrukcija hale oslonjena je uzduž obaju lučnih rubova, u najnižim točkama, na stupove. Preliminarna statička analiza radi provjere koncepcije i približnih dimenzija izvršena je simuliranjem konstrukcije pomoću niza greda s prepustom. Izvedbena analiza izrađena je metodom konačnih elemenata, a rezultati su eksperimentalno provjereni.

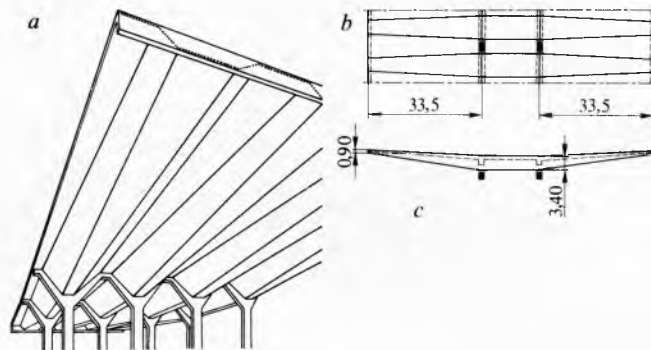


Sl. 53. Auditorij ministarstva vanjskih poslova u Kinshasi. a uzdužni vertikalni presjek, b dio tlocrta krovne konstrukcije



Sl. 54. Nosiva konstrukcija stambene zgrade od koritastih nabora oslonjenih na stupove u obliku Y

Za dvokatnu stambenu zgradu u području s mnogo obočina krovna konstrukcija od pretfabriciranih armiranobetonskih koritastih nabora, raspona 18 m, oslanja se na viljuškaste stupove u obliku slova Y (sl. 54). Stupovi su pretfabricirani od dva dijela i, prije montaže, spojeni zavarivanjem ubetoniranih čeličnih ploča. Stabilnost i krutost u svim smjerovima postignuta je, na ekonomičan i arhitektonski izazovan način, oblikom konstrukcije. Kako je konstrukcija statički određena, eventualno nejednoliko slijeganje tla neće uzrokovati dodatna naprezanja. Drveni strop između obaju katova te vertikalni elementi koji zatvaraju i razdvajaju prostorije obješeni su na krovnu konstrukciju.



Sl. 55. Isječak krovne konstrukcije aerodromske hale u Miamiu. a perspektiva, b tlocrt, c vertikalni poprečni presjek (izmjere u m trima)

Krovna konstrukcija aerodromske hale u Miamiu (sl. 55) primjer je aprizmatičnog nabora velikih raspona; poslužila je kao prototip za više drugih građevina. Može se zamisliti sastavljenom od niza greda promjenljivoga koritastog presjeka s jednim kratkim poljem i dva dugačka prepusta. Donje trapezne ploče čine pritisnut, a gornje zategnut pojas. Konstrukcija se oslanja na dva kontinuirana trapeza okvira.

LIT.: J. Born, *Faltwerke, ihre Theorie und Berechnung*. K. Witwer, Stuttgart 1954. — C. Siegel, *Strukturformen der modernen Architektur*. Callwey, München 1960. — Z. Makowski, *Räumliche Tragwerke aus Stahl*. V. Stahleisen, Düsseldorf 1963. — H. Rühle, *Räumliche Dachtragwerke*. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1969. — T. Koncz, *Handbuch der Fertigteilbauweise*. Bauverlag, Wiesbaden 1975. — H. Engel, *Tragsysteme*. Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart 1977.

R. Rosman

NAFTA (zemno ulje, sirova nafta), tekuća do polučvrsta tvar koja se ponegdje nalazi u Zemljinoj kori, pretežno u sedimentnim slojevima, rjeđe u metamorfnim i magmatskim stijenama. Obično je smeđezelena do smeđecrna, a u reflektiranom svjetlu fluorescira zeleno ili modrozeleno. Poznate su i svjetlije i skoro bezbojne vrste nafte.

Već prema postanku, migraciji i akumulaciji vrste nafte mnogo se razlikuju sastavom i svojstvima, pa se opravdano, namjesto o nafti, govori o naftama. Glavni su im sastojci ugljikovodici. Osim toga, nafta sadrže spojeve mnogih drugih, čak i vrlo rijetkih elemenata. Što im je veći sadržaj sastojaka niskog vrelišta, to su nafta svjetlije, manje gustoće, viskoznosti i molarne mase.

Nafta su često akumulirane zajedno sa zemnim (prirodnim), plinovima, koji se također pretežno sastoje od ugljikovodika, a sadrže još i sumporovodik, ugljik-dioksid i druge spojeve. Osim plinovitih ugljikovodika, oni mogu sadržavati i pare kapljivih ugljikovodika.

Proizvodi prirodnih promjena nafte brojni su i različito se nazivaju. Ima ih i tekućih i čvrstih. Među njima su najpoznatiji zemni voskovi (ozokerit), zemne smole i asfalti (v. Asfalt, TE I, str. 425). Oni nastaju oksidacijom i ishlapljivanjem pojedinih sastojaka nafte. Prirodni asfalti razlikuju se od asfalta koji