

stubove u betonu M300 armirati čelikom Č52, a ne Č37. Ne preti nikakva opasnost ako se ne učini tako; treba biti samo svestan da se čelik nalazi u fazi tečenja na dijagramu σ , ϵ , kad se pri znatnim deformacijama napon u čeliku ne menja. Naponsko stinjavanje je za konstruktore korisna osobina betona. Ona pomaže da se ne povoljni uticaji izazvani od grešaka u našim konstruktivnim sistemima ublaže ili čak uklone. Donekle viskozno ponašanje betona omogućuje tzv. adaptaciju sistema, definisanu od Caquot-a. Samo u slučaju elemenata koje treba računati po teoriji drugog reda, odnosno kod problema elastične stabilnosti, naponsko stinjavanje povećava deformacije, a time i savijanje. Predstava naponskog stinjavanja je prigušena kriva, jer posle 4-5 godina ova se osobina betona više ne manifestuje; materijal se petrifikovao, kaže se nepravilno, jer je i kod stena otkrivena ova osobina.

LIT.: v. *Armiranobetonske konstrukcije*.

D. L.

ARMIRANOBETONSKE KONSTRUKCIJE. Inženjeru Lambotu, Francuzu, pripada prva ideja o izradi konstrukcije od armiranog betona. On je 1850 htio da sagradi čamac koji bi u pogledu rđanja i truljenja imao osobine kamena i u pogledu čvrstoće osobine čelika. Čamac je napravljen, patentiran i danas стоји kao istorijska vrednost u jezeru jednog malog vrta. Primenu armiranog betona na drugom tipu konstrukcija Lambot nije ostavio javnosti.

Monier, Francuz (1823—1906), baštovan po profesiji, ima veću širinu no Lambot u pogledima na mogućnosti primene armiranog betona na najraznovrsnije konstrukcije. Hteo je najpre da prse saksije iz ekonomije vezuje žicom; nju malteriše da ne bi rđala. Nezavisno od Lambota, a kasnije od njega, on prijavljuje jedan za drugim patente za razne vrste konstrukcije. Njegov poslovni duh čini da se patenti uvode u evropskim državama. On, međutim, nije znao kako statički rade njegove konstrukcije. Njemu je konačno ostala samo slava da se po njemu nazivaju pojedini elementi, kao što su Monierovi zidovi i ploče, i mnoga preduzeća.

Hennebique, Francuz (1842—1921), prvobitno stručnjak za građenje u kamenu, imao je dovoljno jasno gledanje na funkcionišanje konstrukcije od armiranog betona. Nekoliko njegovih početnih uspeha vratili su poverenje u armirani beton. On slavu konstruktoru Francuske prenosi i van granica svoje otadžbine; u Rimu se po njegovom projektu i nadzoru gradi most preko Tibra, il ponte del Risorgimento, raspona 100 m. Ovaj most je vrlo dugo držao svetski rekord u veličini raspona, a još duže u vitkosti, stinjenosti njegove lučne konstrukcije. I danas ovaj objekat služi javnom saobraćaju, i pored povećane jačine saobraćajnog opterećenja. Stalna opažanja pokazuju da se most ponaša elastično, iako ima znatan broj prslina na srednjim platnim koja obrazuju rebra lučno-grednog sistema. Sa estetskog gledišta ovaj most važi kao objekat po kom se karakteriše lakoća tibarskih mostova.

Francuzi smatraju Cristophea, Belgijanca, za osnivača teorije proračuna betonskih konstrukcija.

Francuz Considère (1841—1914) je konstruktor, ali i naučnik istraživač. On uводи polukružnu kuku kao efikasan element usidrenja; sem toga, i još važnije od toga, uводи spiralno utezanje betonske mase, što se već zasniva na vrlo supitnoj teorijskoj osnovi: porastu nosivosti betona, materijala sa unutrašnjim trenjem, pod delovanjem njegova utezanja armaturom. U ovom shvatanju leži i osnova teorije loma betona, odnosno aktivisanje bočnog pritiska spirala pod delovanjem plastifikovanja betona i tečenja u stranu. Od Considérea potiče predlog da se na obali Elorna, kod Bresta, izvedu lukovi sa zategama i navezu na gotove stubove; tu je Freyssinet ostvario svoje poznato remek delo, navožeći skelu za betoniranje šupljih lukova u tri raspona po 182 m.

Rabut je veliki konstruktor i pedagog. Njegova je zasluga u naučnoj sintezi uspeha postignutih na polju istraživanja betona i statičkih principa; sem toga, u primeni jednostavnih statičkih principa na složene konstrukcijske sisteme.

Mesnager (1862—1933) je dao nekoliko tipova konstrukcija, iskorisćujući osobine armiranog betona za uprošćenje konstrukcijskih pojedinosti. Tako je nastao zglob njegova imena; u njemu se sva normalna sila predaje koničnom snopu armature; beton ima ulogu zaštite. Mesnager daje nekoliko rešenja problema izotropnih ploča i njihovo armiranje.

Koenen, Nemac, jedan je od osnivača oglednog metoda kontrole teorije proračunavanja. On je prvi inženjer u Nemačkoj koji se poduhvatio da početnim naprezanjima armature otkloni pojavu prslina, bar u fazi korisnog opterećenja konstrukcije. Njegovi ogledi nisu dali pozitivne rezultate: u početku se, dok su nosači bili relativno mladi, osećalo kašnjenje pojave prslina zbog početnih naponu $\sim 500 \text{ kp/cm}^2$ u armaturi; što su nosači bili stariji sve se više gubio ovaj uticaj, a posle izvesne starosti potpuno je nestao. Koenen je imao velik ispitivački ugled u svetu; on je zbog svoga neuspela »zatvorio« problem rešenja početnog naprezanja i na rešavanju tog problema nije se radilo sve dok tehnički duh u kasnijem periodu od 25 godina nije prebrodio svoje i objektivne teškoće.

Mörsch, i Nemac i Švajcarac po mestu rada, ima zasluga u sistematisanju celog naučno-praktičnog gradiva u armiranom betonu. Znatan broj njegovih računskih postupaka iz klasične teorije primenjuje se u celom svetu. Štugartska škola postaje škola praktičara i istraživača svojstava betona.

Dischinger, Nemac, prvi daje upotrebljivu matematičku predstavu promene modula elastičnosti sa vremenom. Njegovi bezbrojni patenti malo su ostvarivani; najčešće samo u okviru preduzeća kojima je dugo rukovodio. Među patentima i naučnim prilozima o uticaju naponskog stinjavanja ili tečenja ima pažnje vrednih radova.

Maillart, Švajcarac, nosilac je dvoosnog, ortogonalnog sistema armiranja pečurkastih ploča. Tvorac je sistema troglobnih lukova sa diferencijalnim zglobovima. Prvi je ostvario konjugovan sistem luk-greda. On diže značaj konstruktorskoj zamisli objekta iznad značaja njegove opširne statičke analize.

Freyssinet, Francuz, prvi primenjuje postupke kompenzacije i rektifikacije armiranobetonskih lučnih sistema. Na jednom vrlo stinjenom mostu, Pont du Veurdre, zbog njegovog progresivnog ugibanja Freyssinet dolazi na ingenioznu ideju da sistemu vraća vremenskim plastičnim tečenjem izgubljenu dužinu. Već između 1910 i 1911 on dolazi na ideju o mogućnosti da se beton, kao i organski materijali, plastično deformiše. Dok je njegov profesor Mesnager te deformacije pripisivao netačnosti merenja, ostajući pri tvrdjenju da je beton petrifikat, dotle je Freyssinet, verujući u tačnost svojih iako kratkotrajnih ogleda, tvrdio da ove deformacije postoje. Za tu tvrdnju su mu bila neophodna dva saznanja: da beton pod naponom ima deformacije zavisne od veličine i vremena delovanja napona, i da se ove spore deformacije završuju u vremenu od oko 5 godina. On je našao da su mogući gubici naponu u čeliku usled ovog »tečenja betona« oko 2000 kp/cm^2 . Da bi od prethodnog naprezanja konačno ostao iznos σ_k , treba prethodno naprezanje izvršiti do $\sigma_k + 2000 \text{ kp/cm}^2$. Za punu definiciju prirode naponskog stinjavanja, ili tečenja, prioritet pripada Davisu, istraživaču iz USA.

Caquot, Francuz, velik je teoretičar i ima velik broj sopstvenih armiranobetonskih sistema u svima vrstama inženjerstva. Od teorijskih radova osobito je značajna njegova hipoteza o razvijanju loma betonskih oglednih tela; ona je dalje produbljavanje Coulomb-Mohrove teorije loma. Opštu teoriju lokalnih naponi saobrazio je naponskim pojavama na dodiru betona i čelika.

Istorijski armiranog betona i njegove nove evolucije nisu završene. I u današnjem periodu se dalje stvara. SSSR i USA svakim danom daju sve vidnije priloge; prva od tih zemalja u postupcima proračuna po teoriji loma, a druga i u problemima elastične stabilnosti. I male zemlje beleže svoje uspehe: Jugoslaviji je priznat idejni prioritet građenja mostova bez skela postupkom slobodne montaže sa početnim naprezanjem; jedan postupak početnog naprezanja razvijen u Jugoslaviji već se primenjuje i u tehnički visoko razvijenim zemljama.

Feret, Francuz, još krajem prošlog i početkom ovoga veka postavlja osnove tehnologije betona. Brz razvoj ove nove nauke prirodna je posledica njena pravilnog postavljanja. Istina, u mnogim zemljama je i kasnije u tom području vladala gotovo anarhija; i pored postojanja nauke, praksa je bila dugo bez njene primene. Nije čudo što su rezultati praktičnog rada vodili tako ne-ujednačenim rezultatima da su neki poznati inženjeri, naviknuti na stalnost mehaničkih osobina čelika, smelo tvrdili za beton da je »materijal bez karaktera«. I to u vreme kada je većinu paramet-

tara od kojih bitno zavisi kvalitet betona Feret bio dobro postavio. On je već više-manje u današnjem obliku odredio uticaj granulometrije agregata, uticaj količine vode i cementno-vodnog faktora, kao i uticaj pora na mehaničke karakteristike betona.

Mogućnost ugradivanja betona čvrste konzistencije postignuta je postupcima vibriranja. Freyssinet je postupak vibriranja idejno pozajmio iz livačke tehnike: vibracionim postupkom se isteruju vazdušni mehuri iz liva. On je uveo postupke zaparivanja betona zasićenim parama pod odgovarajućim pritiscima. Vreme stvrdnjavanja je time gotovo od danâ skraćeno na sate.

Danas je tehnologija betona vrlo razvijena disciplina i pruža vrlo velike usluge svim postupcima građenja u armiranom i ne-armiranom betonu; njemu je »vraćen karakter« i pred onima koji su najviše suzdržani u pogledu karakteristika betona.

PRINCIPI I MEHANIČKE KARAKTERISTIKE ARMIRANO-BETONSKIH KONSTRUKCIJA

Osobina prianjanja, adhezije, betona za čelik smatra se najbitnijim elementom na kojem se zasniva statički spoj ova dva materijala. Prianjanju je vremenom dat i značaj u pogledu zaštite šipki od korozije. Danas je poznato da su pojave koje prate vezu beton-čelik dosta složene i uzajamno povezane. Jednostavnosti radi može se sve ono što je pripisivano prianjanju pripisati usidrnosti, koja sadrži u sebi i prianjanje.

Saradnja beton-čelik tako je prisna da ravni preseci i posle deformacija ostaju ravnji, a oni koji su upravni na osu štapa ostaju takvi i posle deformacija, što omogućuje primenu Bernoullijeve hipoteze. Princip na kome se kao najvažnijem zasniva armirani beton sastoji se u mogućnosti kontinualnog spoja čeličnih šipaka armature sa betonskim delom nosača. Ovaj princip zadovoljen je u životu jedne konstrukcije samo u granicama praktične tačnosti, a ne strogo tačno. Diskontinuitet ovog spoja javlja se vrlo često. Ilustracije radi neka je naveden slučaj diskontinuiteta spoja čelik-beton u okolini prsline nosača napregnutog na savijanje. Na mestu same prsline nema usidrenja, jer je armatura na širini prsline odvojena od betona. Levo i desno od prsline armatura se sidri vrlo naglo, tako je na dosta kratkom odstojanju u masi između dve susedsive prsline ona usidrena toliko da simbioza beton-čelik, u smislu deformacije, predstavlja jedinstven materijal. Svakako da ovaj diskontinuitet u prenošenju napona smicanja po obimu armature predstavlja krnjene osnovnog principa na kojem se zasniva armirani beton. To ipak nije dovelo do takvih teškoća da bi armirani beton došao uopšte u pitanje; za konstruktor je nastala dužnost da često vode računa o lokalnim naponima smicanja po obimu armature i tamo gde se armatura ne završava.

Dosta često se u tumačenju statičkih zbivanja u čeličnom skeletu armiranog betona pribegava zamišljaju nosača rešetkastog sistema; njegovi su zategnuti delovi od čelične armature, a pritisnute štapove obrazuju zamišljeni betonski štapovi. Ovaj princip predstavlja, svakako, najgrublju mogućnu aproksimaciju, bar što se tiče proračuna. Međutim, ovakva primena zamišljenih rešetki, kombinovana sa nekakvim lučnim delovanjem s mestom na mesto, daje objašnjenje pojavi otpornosti u slučaju oglednih nosača napregnutih na savijanje do loma, i onda kad se prsline pretvaraju u prskotine i nalaze se gotovo neposredno jedna uz drugu; onda nije moguće očekivati kontinualan spoj beton-čelik, ostvaren između uzastopnih pukotina. (Naziv prsline je uzet za slučaj kad diskontinuitet nema širinu veću od 0,3 mm te nije opasan u pogledu rđanja armature; prskotinom se naziva diskontinuitet koji je u pogledu korozije opasan, tj. ima širinu veću od 0,3 mm, pa sve do pred sam lom nosača, kad se prskotine pretvaraju u pukotine znatne širine. Tad nosač ne predstavlja kontinualnu masu već složen kinematički lanac poliedarskih komada prilagođenih uslovu ravnoteže sa spoljnim silama. Lom nastaje lokalnim drobljenjem betona.)

Princip neprekidnosti spoja beton-čelik primenjuje se i pri obrazovanju svih veza elemenata koji sačinjavaju neku složenu konstrukciju. U proračunu i konstrukciji obično se armatura oblikuje tako kao da ona čini sama celu vezu. Ovo je dovoljno tačno samo onda kad se radi o zategama; inače se ovaj suviše uprošćeni princip često podvrgava tačnijoj analizi; osobito ako lokalna naprezanja mogu da ugroze celinu sistema na mestu veze. Primer bi za to mogli biti čvorovi rešetke; oni, pod uticajem

geometrijskog oblika sistema i načina prenošenja opterećenja, mogu biti napregnuti sekundarnim naponima koji potiču od krutosti čvorova; sekundarni naponi mogu biti nekad istoga veličinskog reda kao i primarni naponi koji se sračunavaju pod pretpostavkom da su zglobovi centrični i sa čepovima bez trenja.

Sem usidrivosti, važna fizička osobina betona i čelika jeste jednakost i stalnost njihovih koeficijenata toplotnog širenja $\alpha = 10^{-6}$ do $1,1 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$. Pretpostavka linearne zavisnosti širenja od temperature dovoljno je tačna u granicama normalnih topotnih promena; tad konstrukcija i statički radi normalno. Izduženje jednog štapa pri povišenju temperature za $t^{\circ}\text{C}$ iznosi $\Delta l_{(t)} = \alpha l t$; npr. za $l = 10 \text{ m}$, $t = 20^{\circ}\text{C}$, $\Delta l_{(t)} = 10^{-5} \cdot 10^4 \cdot 20 = 2 \text{ mm}$. Pri izboru veličine zaštitnog sloja betona u konstrukcijama izloženima lokalnim temperaturnim promenama treba voditi računa o tome da se topotna provodljivost betona i armature bitno razlikuju.

Važno je napomenuti da se izvesne osobine sastavnih materijala — betona i čelika — menjaju bilo kvalitativno, bilo samo kvantitativno kad se od njih napravi zajednica. Čelik i beton sami imaju svoje stepene krtosti, odnosno žilavosti. U spoju što ga predstavlja armirani beton kvantitativno se menjaju ove osobine — u obe materijale na bolje. Primena čelika vrlo visokih karakteristika (do Č280) zasniva se na promeni značaja krtosti ovih čelika kad se nalaze u armiranom betonu. Ovakvi su čelici vrlo tankih profila, zbog tehnološkog procesa proizvodnje, patentiranja ili drugog procesa; armatura od njih uvek je autoankrovana, prethodno napregnuta armatura, bez kotvi za usidrenje. Ovakav čelik je toliko krt da iz zone elastičnog ponašanja prelazi gotovo odmah u lom, tj. zona izduženja ne postoji; a na račun nje je jedino mogućan razvoj adaptacionih deformacija kakve je definisao Caquot. Van armiranog betona čelici ovako visokih karakteristika kidaju, a niske žilavosti, ne upotrebljavaju se u gravđevinarstvu. U muzičkim instrumentima se ovaj čelik upotrebljava za klavirske i violinske žice — strune.

Uzengije obično idu po obimu preseka; pretpostavlja se da one trpe samo zatezanje, pa se tako i oblikuju da podnesu zatezanje bez oštećenja oblika preseka; one su obično upravne na pravac podužnih deformacija elementa, odnosno padaju u poprečni pravac, tj. u pravac Poissonovih deformacija. Budući da se geometrijski oblik uzengija ne menja od napona u njima pod naprezanjem u pravcu podužne ose elementa, to je poprečna dilatacija betona, kao posledica Poissonova efekta, donekle sprečena obuhvatni uzengijama. Time se postiže delovanje utezjanja betona. Posledica je utezjanja da se ponašanje betona pri deformisanju približava ponašanju izotropnih materijala. Zbog toga su dopušteni naponi za nearmirani i armirani beton bitno različiti; npr. za M300 nearmirani beton ima $\sigma_s = 50 \text{ kp/cm}^2$, a za armirani beton $\sigma_s = 84 \text{ kp/cm}^2$; razlikuju se, dakle, za 68%. U slučaju spiralno armiranih stubova Poissonov broj iznosi oko $m = 4$; za čelik je $m = 3$; za ortogonalno armirane ploče $m = 6$; za napone oko loma $m \geq 10$. Sve su ove vrednosti eksperimentalnoga karaktera.

Armiranje profilima što tanjim a što ćešće rasporedenim po mase elementa, sem toga rasporedenima u tri ortogonalna pravca, približava armirani beton homogenim i izotropnim materijalima. Ovo biva, na žalost, u vrlo uskim granicama napona. Ako je mesto obične armature upotrebljena visokovredna i ako je ova mesto na običan način ugrađena sa početnim naponima, može se oblast homogenog i izotropnog ponašanja armiranobetonskih elemenata znatno i povećati u pogledu napona i proširiti u pogledu vrste elemenata. Često se to može čak i preko granice korisnih napona. Šteta je što se u pravcu pritisaka napon prethodnog naprezanja sabira sa korisnim naponom; zato se on mora smatrati parazitnim. U konstrukcijama koje su podvrgnute vibracijama visoke učestalosti ovako izotropsani betoni mogu imati široke primene, budući da se u tim slučajevima ne radi o preteranoj visini napona već o njegovu karakteru. Tako se mogu sagraditi konstrukcije koje imaju apsolutnu sigurnost od loma zamorom.

Za gotovo sve konstrukcije od velike je važnosti da armatura bude zaštićena od rđanja, pogotovu kad je konstrukcija direktno izložena korozivnoj vodi ili i gasovima. Takvih slučajeva ima u industrijskim, inženjerskim i hidrotehničkim konstrukcijama. Zato su, prema stepenu osetljivosti na koroziju, najmanje dopuštene količine cementa utvrđene propisima; cilj je da se sigurno dobije gust beton koji sprečava rđanje. Pri proračunavanju elemenata koji

prema njihovoj statičkoj funkciji, moraju imati prsline u zoni zatezanja, treba težiti da širine ovih prsline ne budu veće od 0,3 mm. Širine prsline manje od ovih nisu opasne u pogledu korozije armature jer se one zaptivaju, kolmatiraju, rdom, pa ona prestaje da dalje napreduje. Prirodno, ovo je ogledni podatak i ima donekle karakter proizvolnosti; otuda neki autori navode 0,25 mm a drugi 0,40 mm kao dopuštenu širinu prsline. Građevinska mera za sužavanje širine prsline sastoji se u upotrebi što više tanjih profila za proračunat površinu preseka. Sem toga važni su takođe konzistencija plastične mase betona, granulometrijski sastav agregata, količina cementa, vodocementni faktor i, konačno, postupak ugradivanja. Specifični obim profila je $s_o = \frac{o}{f} = \frac{4}{d}$, gde je o obim preseka šipke, f površina preseka, a d prečnik šipke; njega treba svesti na optimalan, što je korisno za smanjenje širina prsline kao i za povećanje usidrvosti armature. Pretpostavlja se da je zbir širina svih prsline na celoj dužini nosača konstantan za zadato opterećenje i određeni nosač. Kad je njihov broj malen, prsline moraju biti velikih širina; opravdana težnja da se njihova širina smanji na najmanju moguću meru može se ostvariti samo uz povećanje njihova broja, ali i velik broj vrlo uskih prsline nije štetan za konstrukciju. Mnogi evropski i sovjetski naučnici daju postupke za proračun dimenzija prsline. Tačnost takvih proračuna je zavisna od elemenata koji su podložni uticaju lokalnih slučajnosti, stoga se i kaže da ovi proračuni »proriču« sračunate mere; to je svakako jedva u skladu sa pojmovima o proračunu. U tehnicu se takvi proračuni smatraju ipak potrebnim; služe potkrepljivanju tehničkog načina mišljenja o nekim pojавama sa parametrima bez dovoljnog discipline.

Osobina betona da se pod uticajem dugotrajnih napona deformiše i plastično, a ne samo elastično, čini armirani beton složen za posmatranje statičkih zbijanja u elastičnoj fazi ponašanja. Pod uticajem ovih deformacija, odnosno naponskog stinjavanja, sile u betonskom i čeličnom delu preseka grupišu se drugačije nego u momentu same pojave napona. Sem toga, i osobina betona da se pri očvršćavanju skuplja čini podelu sila u preseku često vrlo nejasnom. Posledica skupljavanja betona pri otvrdnjavanju je pojava napona zatezanja u betonu a pritiska u armaturi. Ovaj jednostavan odnos se remeti ako zatezanje u betonu bude tako visoko da se pojave prsline. Tad se samo lokalno pojavljuju ova pregrupisavanja sila u preseku; na mestu prsline važi naponska faza IIa, beton se isključuje iz zone zatezanja, a celu silu zatezanja u preseku prima armatura. Naponsko stinjavanje čini da s vremenom pritisak iz betona u velikoj meri prede u čelik. Za teoriju loma ova je »migracija« sila u preseku irelevantna budući da se lom dogada kad svi sastavni delovi kritičnog preseka dostignu puno plastifikovanje. To je svakako prednost plastične teorije loma nad elastičnom.

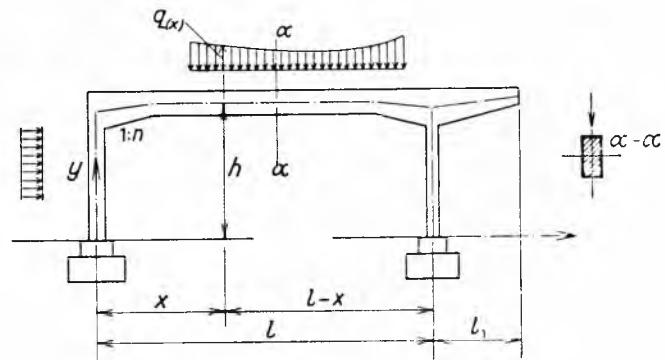
PREGLED SISTEMA KONSTRUKCIJA OD ARMIRANOG BETONA

Konstrukcije se prema načinu prihvatanja opterećenja koja one sprovode i prenose na ležišta dele na *linijske sisteme, poliedarske sisteme i krive površinske sisteme* (translacione i rotacione ljske).

Linijski sistemi. Ovi sistemi obično prenose opterećenje u ravni koja seče presek u jednoj od njegovih osa simetrije. Mnogo je opštije opterećenje koje leži u ma kojoj kosoj ravni. Opterećenje je raspoređeno duž ose sistema po određenu zakonu, kontinualno ili diskontinualno. Načelno, ono može biti ma kakva pravca i smera prema osi sistema. Proračun se sprovodi projektovanjem opterećenja na osu i uzimanjem ove i upravne komponente na osu sistema. Linijski sistemi imaju visinu i širinu nosača istog veličinskog reda; njegova je dužina znatna u odnosu na druge dve dimenzije.

Na sl. 1 predstavljen je okvirni sistem visine h sa konzolom raspona l_1 na gredi raspona l . Osnovna ideja ovakve konstrukcije sastoji se u monolitnoj vezi stubova i greda; takva veza prinuduje stubove i grede da pod delovanjem opterećenja na mestu veze imaju i ista pomeranja i ista okretanja kao i kruto spojeni štapovi. Na taj je način dobijen kontinuitet ne u pravoj liniji, već najobičnije pod pravim uglom. Monolitnost veza se u armiranom betonu neobično lako ostvaruje, pa je i izvođenje okvirnih konstrukcija sa pojmom armiranog betona dobilo snažan zamah prvih decenija

ovog veka. Oblik okvirne konstrukcije zavisan je od namene objekta u koji je ona ugrađena. Sa razvojem konstruktorskog građevinarstva dobijaju se svakim danom novi oblici okvirnih konstrukcija. Teorija ovih konstrukcija je razrađena do u tančine kako za statičke tako i za dinamičke uticaje. Tipičan primer konstrukcija koje primaju pretežno dinamičke uticaje jesu turbinski stolovi.

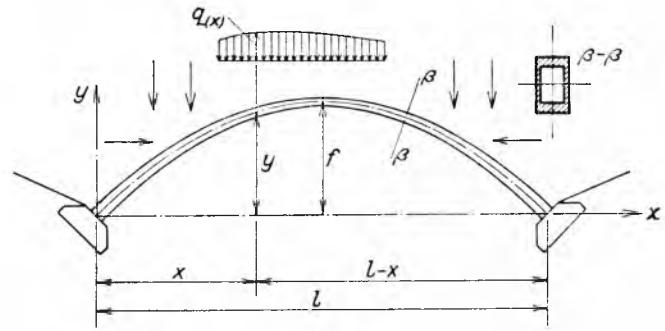


Sl. 1

Osobito je interesantan tip konstrukcija stolova za parne turbine, čiji broj obrtaja u minuti dostiže i 3600. Otklanjanje mogućne rezonancije frekvencija turbine i turbinskog stola vrlo je delikatan problem, kako sa gledišta proračuna tako i sa gledišta konstruisanja stola.

Rasponi okvirnih konstrukcija svakim danom bivaju sve veći, i danas nije redak slučaj $l = 50$ m.

Na sl. 2 predstavljena je konstrukcija u vidu ukleštene luka raspona l , strele f . Lučne konstrukcije su najekonomičnije konstrukcije u grupi linijskih sistema. Njihova se ekonomičnost osobito povećava kada je fundiranje preko temeljnih blokova izvedeno na zdravom tlu visoke moći nošenja. Priroda lučne konstrukcije nosi sa sobom uslove visoke ekonomije: osa luka se obično tako izabere da ona predstavlja potpornu liniju sistema za stalni teret.



Sl. 2

To znači da za stalni teret momenti i transverzalne sile ovakve konstrukcije ne postoje, odnosno $M_{g(x)} = Q_{g(x)} = 0$. Stalno opterećenje izaziva samo centrično naprezanje normalnom silom. Na industrijskim građevinama u obliku velikih hal stalno opterećenje predstavlja glavni uticaj; slučajno opterećenje, sneg i vетар, malo znači, osobito sa porastom raspona; u tom slučaju raste sopstvena težina, sa njom rastu normalne sile, a momenti od snega i veta rastu sporije.

Proračun lučnih konstrukcija u ravni delovanja opterećenja vrši se po uobičajenim postupcima statike. Sa razvojem betonskih i armiranobetonskih lučnih konstrukcija sve se više uvođe popravke statičkih uticaja konstrukcionim merama i specijalnim postupcima. Vrše se dve vrste operacija u svrhu poboljšanja statičkih uslova rada lukova: kompenzacija vraća luku dužinu smanjenu pod raznim uticajima; regulacija vrši, u granicama mogućnosti, povećanju raspodelu momenata duž ose luka. Obe se operacije ostvaruju uvedenjem u konstrukciju sistematizovanih sila, koje — preko

naročitih zglobova načinjenih za ovu svrhu — izazivaju kontrolisane deformacije; sile se izazivaju dovoljno moćnim hidrauličkim presama.

Van glavne ravnih luka prijem bočnih sila vrši se bilo samim lukom bilo spregovima za prenošenje ovih sila. Luk treba da bude dovoljno krut i u bočnom pravcu, kako se ne bi izvao; on treba da ima dovoljnu elastičnu stabilnost.

Razvojem građenja u armiranom betonu, u novije vreme, počevaju se karakteristike betona, osobito čvrstoća na pritisak. Konstrukcije postaju sve vinklje jer dopušteni naponi rastu sa poboljšanjem čvrstoće betona. Tako betonski plitki lukovi, zbog ove vinklosti, počnu da dobijaju toliku pomeranja težišta pojedinih preseka duž ose luka da se proračun ne može više da vrši uz pretpostavku stalnog položaja ose sistema. Ordinate pojedinih tačaka ose sistema moraju se popraviti algebarskim dodavanjem njihovih ugiba. U ovakvim slučajevima ne važi linearna zavisnost između uticaja i opterećenja; ne mogu se iskorišćivati uticajne linije; zadatak se rešava probanjem i načelno se momenti zbog ugibanja ose sistema povećavaju. Ovakav proračun, u koji se uvođe i uticaji do pomeranja ose sistema, u literaturi se naziva teorija drugog reda.

Za lukove većih raspona upotrebljavaju se razuđeni preseci mesto punih. Razudivanje preska se vrši tako da se dobije što veća širina jezgra preseka. Ovim se omogućuje da presek savlada znatnije momente savijanja bez pojave zatezanja u preseku. Normalna sila u luku ima isto dejstvo kao kablovi u prethodno napregnutom sistemu; luk je prirodno prethodno napregnut, što je često služilo kao ideja vodilja pri razvoju prethodno napregnutih nosača.

Linijski se sistemi, kao paralelne konstrukcije, obično čvrsto vezuju poprečnim sistemima; tako se dobijaju novi linijski upravljni sistemi. Očigledno se onda dobija prostorno delovanje konstrukcije kao celine. Proračunavanje takvih prostornih sistema dosta je složen i prečutno se prelazi preko prostornosti upotrebom uprošćena proračuna sistema u ravni. Jednostavni sistemi rigorozno se proračunavaju kao prostorni sistemi samo izuzetno, ako su od velikog značaja.

Ravni površinski sistemi. Ploče se prostiru preko linijskih oslonaca, načelno paralelnih sa koordinatnim osama. Tako se obrazuju pravougaone ploče. Kad je oslanjanje po kružnim linijskim osloncima, dobijaju se rotacioni sistemi. Mogućan je slučaj kosih ploča; njihove su strane obrazovane paralelogramima određenih ukrsnih uglova. Funkcija objekta može nametati vrlo različite pravce naleganja; onda se dobijaju trougaoni, mnogougaoni, trapezni i drugi oblici ploča. Najzad, ploče se mogu oslanjati ne linijski već na definisane površine; takve su ploče bez rebara, oslojnjene na tzv. kapitele; opšte se takve ploče nazivaju *pečurkaste ploče*. Opterećenje je podjeljeno po površini ploče — kontinualno ili diskontinualno — i deluje upravno na srednju površinu ploče. Može biti i opterećenje kosog pravca; u tom se slučaju radi sa komponentama upravnim na srednju ravan ploče i komponentama u toj ravni. Geometrijski, ploča ima debljinu malu u odnosu na druge dve dimenzije — širinu i dužinu.

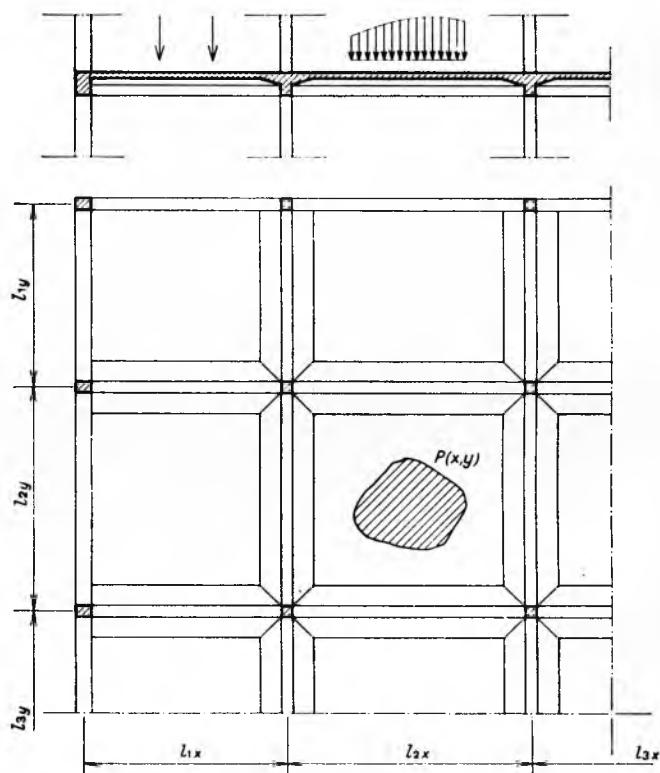
Na sl. 3 nacrtan je u preseku i horizontalnoj projekciji sistem kontinualnih ploča u dva ortogonalna pravca. Ploče se oslanjaju na rebara koja obrazuju roštilj. Radi uprošćenja proračuna pretpostavlja se da se rebara ne ugibaju pod uticajem opterećenja na ploči, odnosno ploče se proračunavaju kao da leže na nepomičnim osloncima. Sem toga se pretpostavlja da se ploče mogu nad rebrima da okreću bez zaokretanja rebara, odnosno da rebara nemaju torzionog otpora. Samo u izuzetnim slučajevima vrši se tačan proračun bez ovih uprošćenja. Prema odnosu strana ploča, l_x i l_y , razlikuju se u praksi ploče armirane u jednom i u dva pravca. Kada je jedan raspon ploče dvaput veći nego drugi, pretpostavlja se da takva ploča nosi opterećenje u kraćem pravcu. To znači da se celo opterećenje sa ploče prenosi na rebara koja su na odstojanju kraćeg raspona; druga rebara ne primaju sa ploče nikakvo opterećenje. Ovo je ponekad dosta daleko od stvarnosti; stoga se sve više javljaju teorijski radovi sa tablicama i grafikonima koji vode računa o prenošenju opterećenja u oba ortogonalna pravca bez obzira na odnos $l_x : l_y$. Ipak se u praktičnim slučajevima, kad je opterećenje pretežno ravnomerno podjeljeno po celom polju ploče, najčešće proračun vrši uz pretpostavke koje ga olakšavaju.

Uprošćeni proračun ploča, kao da prenose jednak podeljeno opterećenje u dva ortogonalna pravca, zasniva se na pretpostavci da je pritisak ploče na rebara jednak podeljen, a to je gruba pretpostavka. Prenošenje opterećenja u dva pravca vrši se na osnovu činjenice da trake jedinice širine u sredini ploče imaju iste ugibe pod podeljenim opterećenjima u odgovarajućim pravcima. Tako se da odgovarajuća opterećenja u pravcima $x - x$ i $y - y$ dobijaju ugibi u sredini polja $q_x l_x^4 \alpha_x = q_y l_y^4 \alpha_y$; a uslovi ravnoteže daju $q = q_x + q_y$. Rešavanjem po nepoznatim dobija se

$$q_x = q \frac{\alpha_y l_y^4}{\alpha_x l_x^4 + \alpha_y l_y^4} = x_x q, \quad q_y = q \frac{\alpha_x l_x^4}{\alpha_x l_x^4 + \alpha_y l_y^4} = x_y q.$$

Veličine α_x i α_y zavise od uslova naleganja ploča na ivicama. Za opterećenje preko svih polja ploče, tj. za totalno opterećenje, kontinuitet predstavlja puno ukleštenje. Tako je onda $\alpha = \frac{1}{8}$ za obe ukleštene, $\alpha = \frac{1}{3}$ za jednu ukleštenu i $\alpha = \frac{1}{8}$ za obe slobodne strane ploče na jednom rasponu.

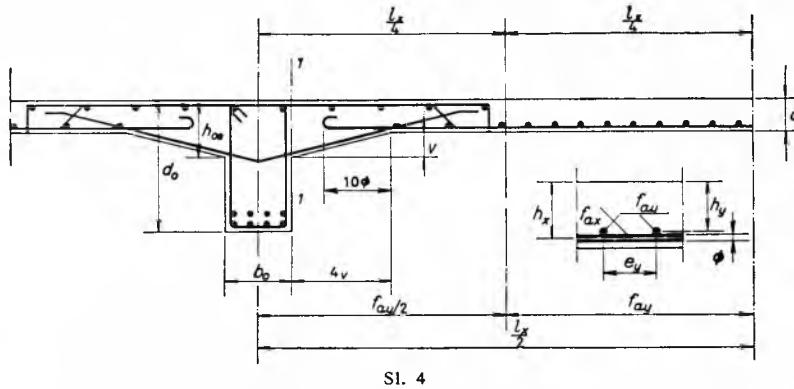
Kad je jednom odredena raspodela opterećenja q na q_x i q_y , proračun se sprovodi kao za linijske sisteme duž cele širine ploče, a ne samo na sredinama. Za armiranje ovakvih ploča čest je naziv „krstasto“, zbog dve uzajamno upravne armature u poljima ploče. Funkcije x_x i x_y uzimaju se obično iz tablica; među njima vlada odnos $x_x + x_y = 1$. Proračun ploče se vrši kao da tu postoji pravougaoni presek $b = 100$ cm, a visina se određuje iz većeg



Sl. 3

od dva momenta u polju: $h_x = r \sqrt{\frac{M_x}{100}}$; visina u drugom pravcu je $h_y = h_x - \phi$, gdje je ϕ prečnik šipki armature ploče. Površina armature se sračunava iz $f_{ox} = \frac{bh\mu}{100} = h_x \mu$. Koeficijent visine r dobija se iz tablica za dopuštene napone armature i betona; naporedio sa koeficijentom nalaze se ostali potrebeni koeficijenti: μ za armaturu, s za položaj neutralne ose i $1 - \frac{s}{3}$ za krak unutrašnjih sila. Kad napon u betonu nije iskorišćen, određuje se koeficijent visine iz $r = \frac{h}{\sqrt{M/100}}$; taj slučaj nastupa ako konstruktor ima na

raspoloženju veću visinu ploče no što to zahtevaju dopušteni naponi. Ovaj slučaj je vrlo čest u praksi, jer se sve ploče jedne konstrukcije izrađuju iste debljine, određene prema najvećem momentu u kritičnom polju. Svi ostali preseci imaju neiskorišćene napone u betonu; sračunava ih se koeficijent visine i u tablici zadatog



Sl. 4

σ_a nalazi se ovaj koeficijent visine; pored njega i svi ostali koeficijenti.

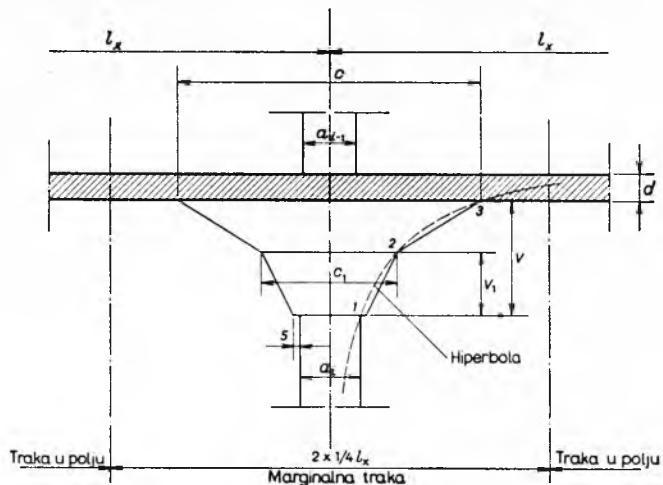
Na sl. 4 predstavljen je presek ploče sa nosačem i ojačanjima nad njim. Visina v ovih ojačanja, *vute* (franc. voûte), određuje se prema najvećem negativnom momentu u celoj konstrukciji; budući da je, radi jednostavnosti rada, uslovljeno da debljina ploče bude stalna, usvaja se da bude stalna i visina vute, pa je onda visina ploče nad osloncem, u preseku $I - I$, $h + v = h_{os}$. U krajnjim četvrtinama ploče, zbog štednje, a staticki opravdano, svodi se armatura na $1/2$; samo u srednje dve četvrtine raspona uzima se puna armatura odgovarajućeg indeksa; u rasponu l_x tačkama je predstavljena armatura f_{ay} .

Torziona otpornost sprečava uvijanje ploče; ona smanjuje momente sračunate iz q_x , odnosno q_y , za odgovarajuće linijske sisteme nosača, prema njihovim uslovima oslanjanja. Ovo se smanjenje vrši množenjem sračunatih vrednosti, samo momenata u polju, koeficijentima manjim od 1, čije je veličine, u obliku funkcija od l_x i l_y , i uslove naleganja dao Marcus. Uvijanje uslovjava postavljanje dijagonalne armature u uglovima slobodno oslonjenih ploča. Ova armatura na donjoj graničnoj površini ploče ide upravo na dijagonalu, a u gornjoj paralelno s njom. Na sl. 5 je shematski predstavljen detalj armature ploče koja slobodno naleže u oba ortogonalna pravca. Kad je ploča vezana monolitno sa osloncem, nije potrebna ova dodatna ugaona armatura; u tom slučaju same ortogonalne armature primaju i momente uvijanja. Sem ovakvih oblika kose armature, ima povoljnijih oblika za izvođenje ortogonalne armature za ojačanje uglova. Da se ugao A ne bi odigao pod uticajem momenata uvijanja, mora se on ili pritisnuti ili zatkotiti u masu ispod njega silom $Q/8$, gde je Q težina celog polja ploče: $l_x l_y \cdot q = Q$ a $q = g + p$ zbir stalnog i pokretnoga, korisnog tereta.

Treba napomenuti da se, iako je proračun ploče uprošćen kada je ona duga, $l_x : l_y > 2$, i u ovim slučajevima vodi računa o dvoosnom naponskom stanju uzimanjem podeone, odnosno poprečne armature u veličini najmanje 20% od glavne armature. Kad bi na ploči delovalo opterećenje po celoj površini, činilo bi se da duga ploča nema napona u pravcu dužeg raspona. Na njihovim krajevima, međutim, ima ih, i to vrlo izrazitih; u polje,

daleko od krajeva, mora se ploča armirati bar za Poissonov efekt, odnosno za $M = vM_x$. Za ploče je Poissonov broj $m = 6$, odnosno koeficijent $v = 1/6 = 0,16$; zato se uzima $f_{a1} = 0,20 f_a$, tj. dvadeset procenata od glavne armature. Ako ima i koncentrišanog opterećenja, treba oву armaturu povećati, ali — prema propisima — ne više od 60%. Izbor veličine podeone armature između 20 i 60% vrši se prema širini raspširovanja tereta na način ustanovljen propisima.

Na sl. 6 prikazan je drugi oblik ravnog površinskog nosača u obliku ploče bez rebara. Oslanjanje ovih ploča vrši se na srednjim stubovima površinski, ne linijski kao krstasto armiranih ploča. Na krajeve stubove se u poslednje vreme, sve više, i ove ploče oslanjaju linijski, iz arhitektonskih razloga. Mogu se, međutim, dosledno sa oslanjanjem na srednje stubove preko celih kapitela, i na fasadnom zidu srednji stubovi da osline na $1/2$ kapitela, a ugaoni na $1/4$ kapitela. Ovaj sistem konstrukcija ponikao je u USA i inspirisan je dnem lokomotivskog parnog kotla, gde zadaću stubova vrše srednje cevi, koje spajaju dva dna kotla. I danas postoji u USA velik broj patenata za izvođenje ovakvih ploča. Ovi se medu sobom razlikuju uglavnom po načinu rasporeda armature u njima. Švajcarski inženjer Maillart je prvi preporučio najjednostavniji način armiranja: ortogonalnim sistemom armatura poljima i nad kapitelima, a linijskim sistemom nad stubovskim, u

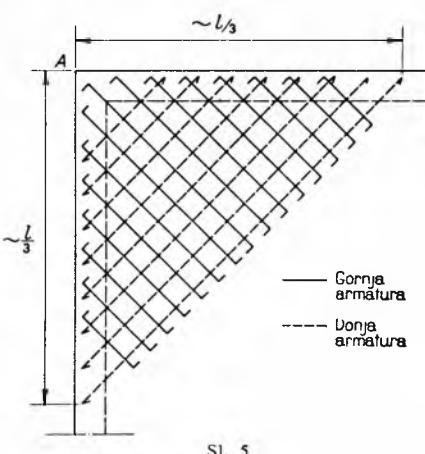


Sl. 6

odnosno nad marginalnim trakama. Ovakav način armiranja on je eksperimentalnim putem proverio na modelu prirodne veličine. Tada je razradio i jednostavan teoriju za proračunavanje ovih ploča. Momente u 11 karakterističnih preseka za svaku, i najsloženiju, pečurkastu konstrukciju on određuje u obliku $M_i = \frac{G}{\alpha_g} + \frac{P}{\alpha_p}$.

Ovdje su G i P stalan, odnosno koristan teret jednog polja: $G = l_x l_y g$ i $P = l_x l_y p$; α_g i α_p su eksperimentalni parametri i dati su kao celi brojevi od 23 do 60, prema mestu preseka na ploči čiji se moment proračunava.

Sirina kapitela u oba pravca je $c = 0,4\sqrt{l_x l_y}$; pri tom se l_x i l_y mogu razlikovati najviše za 10%; tada se može upotrebiti ovako jednostavan postupak proračuna. Ako se rasponi razlikuju više od 10%, treba proračun vršiti nešto složenijim postupcima. Kod nas se u tom slučaju upotrebljavaju zvanična uputstva za ovo proračunavanje. Ona su izrađena na osnovu eksperimentalno-analitičkih postupaka razvijenih u USA a dopunjavanih u SSSR. Propisi nekih zemalja, i pored iskustava u drugim zemljama, ostaju dosledni u primeni teorije za proračun ovakvih pečurkastih ploča, koje daju često i 100% veće uticaje u pojedinim preseцима. Rošova merenja pokazala su na mnogobrojnim izvedenim objektima bolje slaganje eksperimentalno-teorijskih proračuna no čisto teorijskih. Ovo dolazi otuda što uslovi površinskog naleganja u radovima Lewea i drugih nisu stvarno onakvi kakvi se prepostavljaju prilikom proračunavanja. Sem toga, kapiteli i ploča rade kao prostorni sistem.



Sl. 5

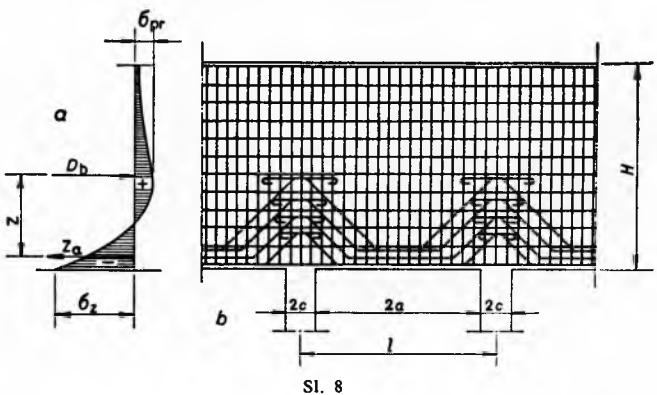
Oblik kapitela zavisi od izabrane arhitekture konstrukcije. On, međutim, mora da zadovolji uslov da nijedna tačka konture kapitela ne sme da uđe iza tačkasto prikazane hiperbole. Ova kriva omeđuje granicu gde je napon smicanja od prodora u kapitelu jednak dopuštenom smičućem naponu τ_a ; ovaj napon može sam beton da primi sa punom sigurnošću. Hiperboline su asymptote osa stuba i gornja površina ploče; tačke kapitela 1, 2 i 3 nalaze se na ovoj hiperboli. Tako su odredene v_1 , c_1 i v , a c mora da zadovolji još i uslov da je $= 0,4\sqrt{l_x l_y}$.

Pećurkaste tavanice imaju nekoliko prednosti nad ostalim, pa i krstasto armiranim tavanicama, kojima su po dispoziciji osnova najblježe. Ove tavanice, budući da nemaju rebra a ploče su im uglavnom iste debljine kao krstasto armiranih ploča, zahtevaju najmanju gradevinsku visinu konstrukcije. U zadati gabarit višespratnih gradevina, do 6 spratova, obično ulazi jedan sprat više ako su tavanice pećurkaste. Količina utrošenog materijala, betona i čelika, u oba konkurentna tipa gotovo je ista. Prednost je pećurkastih tavanica što zahtevaju jednostavnu opлатu; ona se obično u poljima radi od celih dasaka, bez sečenja i stvaranja otpadaka. Kapitalska opłata, kad se mnogo puta ponavlja, pravi se kao gradevinski inventar preduzeća. U USA i SSSR ove se tavanice veoma često upotrebljavaju iz ekonomičkih i estetičkih razloga, a i zbog lakog održavanja čistoće. Ukoliko se ne upotrebljavaju eksperimentalno-teorijski postupci proračuna već se primene postupci zasnovani na teorijskoj analizi, ekonomičnost ovih konstrukcija opada; one postaju čak i skuplje od krstastih ploča sa rebrima. Ali u Nemačkoj se one ipak često upotrebljavaju zbog drugih njihovih prednosti. U našoj zemlji izgrađeno je veoma mnogo magacinskog prostora u ovom sistemu tavanica; nas nikada nisu propisi ograničavali u izboru proračunskih postupaka; blagovremeno su (1937) dobro odabrani Maillartovi, a 1948 su po iskustvima USA i SSSR razrađena privremena uputstva za proračun ovih konstrukcija.

Elastična platna primaju glavno opterećenje u svojoj srednjoj ravni. Ona u stvari predstavljaju tanke a vrlo visoke linijske nosače, ali iz njih se moraju izuzeti zato što se ne mogu proračunavati uz Bernoullijeve i Navierove klasične pretpostavke; preseci koji su pre deformacija ravnii i upravni na osu sistema ne ostaju ravnii i posle deformacija, tako da dijagram napona, načelno, nije pravolinijski. Uticaj smičućih napona je presudan u obrazovanju krive površine prvobitno ravnog preseka. Može se uzeti da je visina nosača veličine $1/\sigma_z$ raspona nosača ona granica kada su — osobito u oblasti velikih transverzalnih sila, odnosno oslonaca — krivljjenja preseka već velika; tada se proračun mora da vrši na specijalan, tačniji način. Zanimljivo je napomenuti da kad je $h \geq l$, visina platna nema bitnog udela na njegovo dimenzionisanje; sem toga nije svejedno za naponsku sliku ovoga sistema da li je opterećenje predato nosaču na gornjoj ivici ili ma gde po visini, ili visi o njemu. Prilikom određivanja integracionih konstanti ovo se uvodi u račun preko graničnih uslova zadatih po opterećenju. Širina platnā je malena u odnosu na njihovu dužinu i visinu.

Zidna elastična platna obrazuju se na konstrukcijama koje imaju malo odstojanje stubova, a velike visine prostora za smeštaj raznog sadržaja. Na bunkerima za smeštaj uglja i ruda pojavljuju

se elastična platna srednjih visina, na silosima za smeštaj žitarica ili silirane stočne hrane javljaju se elastična platna velike visine. Na sl. 7a prikazan je presek bunkera sa ekscentričnim levkom, a na 7b presek celija silosa sa centričnim levicima.



Sl. 8

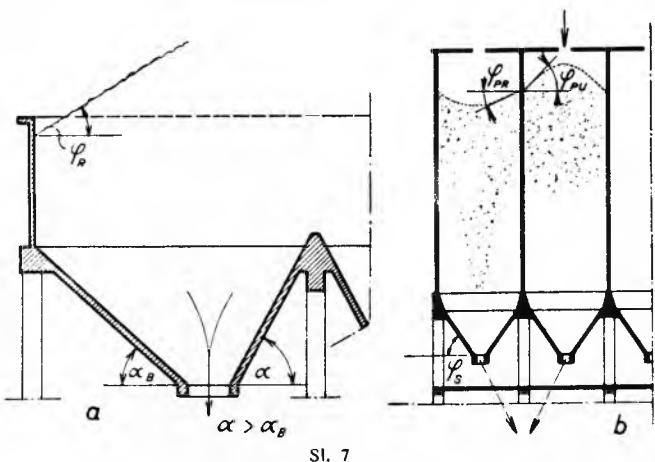
Opterećenje i bunkerskih i siloskih zidova deluje u dve ravni. Levci obešeni o srednju ravan savijaju zidna elastična platna kao linijske nosače velikih visina; horizontalni potisak upravan na srednju ravan savija elastična platna kao ploče; sopstvena težina platna, raspoređena centrično po celoj visini, i trenje sadržaja, raspoređeno po nekom krivolinijskom zakonu po stranama elastičnih platna, savijaju elastična platna isto tako kao linijske nosače velikih visina, malih raspona, ali na drugi način ne obešeni levci.

Napone od savijanja na sredini elastičnog platna prikazuje dijagram na sl. 8a. Nad osloncem dijagram je po obliku sličan, samo se smenjuju zatezanje i pritisak. U polju je, naime, pritisak prigušen njegovim prostiranjem po velikoj visini platna, a vrlo je izraženo zatezanje na donjoj ivici, dok je nad osloncem utišano zatezanje, a vrlo izražen pritisak na donjoj ivici. Veličina napona σ_z ili σ_{pr} , kao i krak unutrašnjih sila u slučaju visine $H \geq 2a$, ne zavise od visine. Postoje radovi koji rešavaju ovaj problem — neki teorijski rigorozno, drugi manje teorijski — i daju za praktičnu primenu iscrpne podatke o naponima, armaturi potrebnoj za prijem momenata u polju i nad osloncem i za prijem kosih glavnih napona. Neka zapažanja sa izvedenih vrlo značajnih gradevina pokazuju da su stvarna naprezanja verovatno povoljnija od teorijskih i da se potrebne količine čelika mogu smatrati kao dosta oprezno proračunate, osobito rigoroznijim postupkom. Ova će oblast, sigurno, biti i dalje predmet teorijskih i eksperimentalnih ispitivanja, osobito u smislu uvođenja uticaja plastičnih smicanja na ublažavanje izraženih ekstremi i povećanja kraka unutrašnjih sila.

Na sl. 8b prikazana je armatura u vidu čeličnog ortogonalnog tkiva, prave armature u polju između oslonaca za prijem pozitivnih momenata, nad osloncima za prijem negativnih momenata, i koso povijene armature za prijem glavnih napona zatezanja u oslončkoj oblasti. Ortogonalno tkivo prima, sem sile iz sistema elastičnog platna, još i sile koje potiču od savijanja ovih zidova opterećenjem upravnim na srednju ravan.

Poliedarski sistemi. Spajanjem ploča ili elastičnih platna, ili jednih sa drugima, pod određenim uglovima, bilo zglobnom vezom u preseku upravnom na pravac ose ili čvrstom vezom, obrazuju se poliedarski sistemi. Obrazovanjem prizmatičnog sistema poliedarske konture može da se savlada velik raspon ako se sistem nad osloncima celinski ukruti bilo punim dijafragmama (u manjim konstrukcijama) bilo zamjenjujućim dijafragmama u obliku linijskih okvirnih ili rešetkastih sistema. Bitna je odlika ovih sistema da elementi preseka imaju, poređ statičke funkcije, i funkciju obrazovanja ogradiena prostora. Ova osobina dvostrukе funkcije i relativno velike statičke visine, odnosno preseka sa velikom širinom jezgra, daje vrlo racionalna rešenja krovova i konstrukcija industrijskih gradevina. Debljina poliedarskih konstrukcija malena je u odnosu na druge dve dimenzije; sem toga, elementi poliedarske konstrukcije imaju stalan relativan odnos, određen utilitarnošću konstrukcije. Zbog male debljine ovi se sistemi nazivaju i poliedarske ljske.

Prvi objekti poliedarskog tipa bili su Freyssinetovi hangari za smeštaj dirižabla u Orlyju kod Pariza. Oni su bili sagradeni od



Sl. 7

lukova paraboličnog oblika, preseka prema sl. 9a. Na pogodnom rastojanju ostavljeni su otvori na slemenu preseka za osvetljenje hale. Visina d_0 je promenljiva, saobražena statickim zahtevima da se normalna sila iz lučnog delovanja sistema nalazi u jezgru preseka. Zbog ovakve razduženosti preseka (masa je daleko od težišne linije) jezgro ima veliku širinu. Ovaj profil je pogodan i u pogledu odvodnjavanja, jer strane nagnute pod uglom α daju kišnici veliku brzinu; zbog povoljnog hidrauličkog radijusa, u uvali profila dobija se povoljniji uslov oticanja, povećanjem količine vode u ovako obrazovanom rigolu. Zbog povoljnih uslova oticanja, hangari nisu imali nikakav specijalan pokrivač. Potrebna armatura, zbog znatnih dimenzija preseka i malih debljina zidova, bila je glavna u poprečnom pravcu; u podužnom pravcu, zbog povoljnih naponskih stanja, bila je samo montažna, bez statickoga značaja. Hangari su 1916 godine bili sagrađeni na pokretnim skelama. Oni su predstavljali početak ovakva načina građenja; sa ciljem racionalisanja skela, najskupljih radova pri građenju konstrukcije znatnih dužina, raspona i visina, $300 \times 80 \times 54$ m. Nikad nisu upotrebljeni za namenjenu svrhu i Nemci su ih srušili u Drugom svetskom ratu.

Razvijajući dalje ideju poliedarskih konstrukcija, Nervi je ostvario objekt od velikog značaja iz prefabrikovanih komada lukova na izložbenom paviljonu u Torinu. Sem toga, koristeći se svojstvom lučnih sistema da imaju neznatne transverzalne sile, on je zamolio pune zidove okvirnim konstrukcijama; time je postigao vrlo povoljno osvetljenje izložbenog prostora. Glavni sistem može se smatrati kao Vierendeelov nosač lučnog tipa; jedini štapovi ispušne, prečke, u tom su slučaju neznatnih dimenzija jer su dimenzijske njihova preseka zavisne uglavnom od transverzalnih sile. Prema shematisiranom preseku ovoga nosača neposredno blizu oslonaca, sl. 9b, λ i d_0 smanjuju se sve dok se ceo nosač ne pretvori u jednu ploču; preko nje se tada konstrukcija oslanja na kose elemente, raspoređene prema arhitektonskom zahtevu hale, oslonjene o temeljne blokove. Ovo sažimanje više lukova (tipa na sl. 9b) u jedan snažan zidni nosač, radi oslobođenja arhitektonskog prostora i oslanjanja o temeljne blokove, predstavlja osobitu konstruktorskiju čar.

Najjednostavnija ilustracija poliedarskog sistema bio bi dvodobni krov prikazan na sl. 10 u poprečnom i podužnom preseku.

U ovom slučaju, ako je kontinualno oslonjena konstrukcija na ivici ploče pod nagibom, ona prenosi opterećenja u poprečnom pravcu kao kontinualna na tri oslonca. Sl. 10a prikazuje momentnu liniju i liniju transverzalnih sile. Horizontalnu komponentu potiska primaju ili mestimične zatege u pravcu ose y ili ivični nosači, koji predaju svoje oslončake sile dijafragmama; u njima su onda zatege za prijem horizontalne komponente iz ploča A i D . Ovo nije jedina mogućnost postojanja stabilnoga statickog sistema. Mesto čestog oslanjanja po dužoj strani, sistem se može osloniti samo na četiri tačke. Cela konstrukcija radi staticki drukčije no u prvo

opisanom slučaju. Kontinualna ploča pretvara se onda u poliedarsku ljsku sa stranama A , B , C i D konačnih dužina koje su spojene u monolitnu celinu tačkama 1 , 2 i 3 . Prenošenje opterećenja se bitno razlikuje od onoga u napred opisanom sistemu, gde se zategama tačke 1 , 2 i 3 čine nepomerljivim; u poliedarskoj ljski one su pomerljive. Mesto glavne transverzalne armature na rasponu $\lambda_s = \lambda/\cos \alpha$, duž raspona l oslonjenog sistema, sa nepomerljivim tačkama 1 , 2 i 3 , dobija se sistem sa glavnom armaturom poliedarske ljske duž raspona l . Poprečna armatura onda ima funkciju armature za prijem kosih glavnih napona i za prijem lokalnih napona zatezanja. Dijafragme primaju opterećenje od ploča u obliku sručnih sile u dodirnom preseku između ploča i dijafragmi. Da bi poliedarska ljska zadovoljavala uslove dugih ljski, potrebno je da odnos $l/2\lambda$ bude najmanje 4; za takve se ljske može lakše izvršiti proračun no za kratke, kada je odnos raspona i širine manji od 4.

Poliedarski oblik daje se ovakvim konstrukcijama ili iz funkcionalnih razloga ili zbog toga što se uprošćuje oplata. Na sl. 9b prikazani shematisirani presek nije pravolinjski; ovi oblici bolje zadovoljavaju estetičke zahteve izložbenog objekta. Hala je izrađena od montažnih elemenata; kad se montažni elementi ponavljaju dovoljan broj puta, uprošćenje oplate nije značajno za njihovo koštanje.

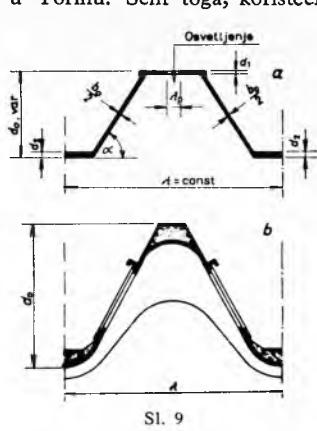
Presek prikazan na sl. 9a, b može biti po karakteru isti u oba ortogonalna pravca. Tada se dobija konstrukcija u obliku piramide, a ako ima slemena, onda u obliku četvorovodna krova. I takva konstrukcija može biti ili oslanjena po ivicama osnove, sa prihvaćenim potiscima, ili se može oslanjati samo u četiri tačke. U prvom se slučaju konstrukcija sastoji od čvrsto povezanih trougaonih ili trapeznih ploča, u drugom se radi o prostornoj konstrukciji poliedarskog tipa u dva ortogonalna pravca. Levci bunkera i silosa obično predstavljaju obrnute piramide; na trougaone ploče koje ih obrazuju deluje opterećenje pritiskom iznutra. Prostorna poliedarska konstrukcija teško se proračunava ako nije zadovoljen uslov za dugu ljsku. U praksi se onda pristupa grubom približavanju preko pretpostavki za koje se zna da se mogu uzeti kao najnepovoljniji osnovi aproksimativnog proračuna.

Krivi površinski sistemi. Translacione ljske. Ako se zamisli presek linijskog nosača u obliku segmenta luka određenih geometrijskih karakteristika, dobija se nosač u obliku ljske. Najčešće je luk kružni segment i tada se dobija cilindrična ljska. Prema odnosu dužine tetine luka i dužine cilindra iz kojeg je isecena ljska od oslonca do oslonca razlikuju se duge i kratke ljske. Za duge ljske mogu se pri razradi teorije zadržati poznate klasične pretpostavke; za kratke ljske to ne bi bilo dovoljno tačno jer se kod njih i ne izražava savijanje između oslonaca, već više kupolno-svodno delovanje. Sa dovoljnom tačnosti one se mogu smatrati dugim, npr. cilindričnim, ljskama, ako je odnos tetine i dužine 1 : 4. Ako osa sistema nije prava linija, već je, npr., kružni luk, dobija se odsek torusa. U prvom slučaju se radi o ljsuci jednostrukoj, a u drugom dvostrukoj krivine. Ovakvi sistemi moraju nad osloncima imati dijafragme, bilo pune bilo razdužene, kako odgovara njihovoj arhitektonskoj funkciji. Bez dijafragmi koje povezuju u jedinstven linijski sistem element krivolinijskog preseka nema celinskog delovanja nosača, pa konstrukcija nema ni moći nošenja.

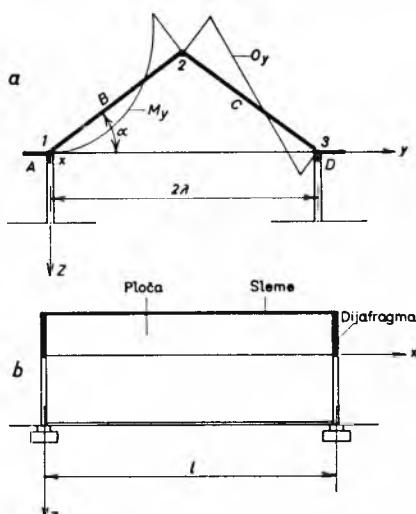
Sem nosača linijskog prostiranja preseka u obliku neke geometrijski definisane ljske, postoje i konstrukcije od ljski koji se razapinju u dva koordinatna pravca. To su obično ljske dvogube

krivine: $\frac{1}{\rho_x}$ i $\frac{1}{\rho_y}$. Betonu one odgovaraju kao materijalu, tj. naponi

su pretežno pritisici, ako je Gaussova krivina $\frac{1}{\rho_x \rho_y}$ pozitivna. Obično se i ove ljske vezuju monolitno dijafragmama različitoga statickog i konstruktivnog oblika. Dijafragme se pretpostavljaju bez otpornosti upravno na njihovu ravan; tako se opterećenja sa ljski na dijafragme prenose putem otpora smicanja ljske po dodirnoj strani dijafragme. Ova je obično ljskom opterećena ekscentrično. Preko dijafragmi opterećenje se prenosi u uglove osnove zgrade. To daje mogućnost da se konstruišu građevinski objekti vrlo velikih površina bez srednjih stubova. Ljske između dijafragmi mahom rade na pritisak; tek u okolini dijafragmi nastaje poremećaj



Sl. 9



Sl. 10

ARMIRANOBETONSKE KONSTRUKCIJE

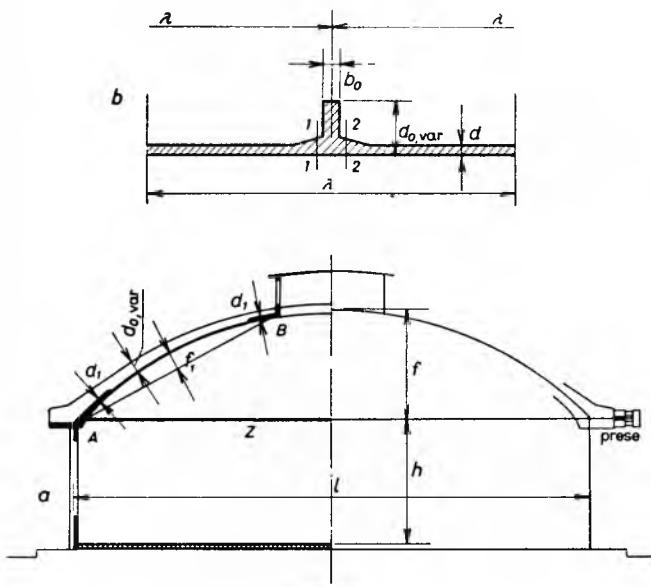
u ovom vrlo povoljnom naponskom stanju, zbog neostvarenih membranskih uslova oslanjanja na vezi dijafragma-ljuska. Elementi sa ulogom dijafragmi glavni su nosioci koštanja ovih inače vrlo racionalnih konstrukcija. Obično su dijafragme u obliku lukova. Njihovo je koštanje više no dva puta veće ako lukovi moraju biti sa zategama nego kad zatege nisu potrebne. Prenošenje potisaka neposredno na tlo ekonomski je vrlo povoljno: zatege u klasičnom obliku koštaju najčešće znanto više nego sami lukovi; zatege od prethodno napregnutog betona tehnički su svršishodnije, ekonomski povoljnije nego klasične zatege. Ovo dolazi otuda što je po jedinici prenetog potiska znatno jevtinije prenositi potisak kablovima no običnim čelikom, a betonska masa za ostvarenje početnih napona proračunava se samo iz potiska izazvanog korisnim teretom, koji je u industrijskim građevinama obično neznatan jer potiče samo od snega i veta.

U oblasti ljuski konstrukcije su prethodile teoriji i njihovoj statičkoj analizi. Ova pojava je gotovo redovna. U daljem razvoju jednog tipa konstrukcije može statička analiza da navede konstruktora na nove oblike. Izvesni teorijski problemi mogu da ostanu stalno na dnevnom redu; a s vremenom na vreme o neispitanim pojavama neka gradevinska katastrofa pruži po koji podatak. Takav je slučaj danas sa problemima elastične stabilnosti ljuski, osobito ljuski dvogube krivine.

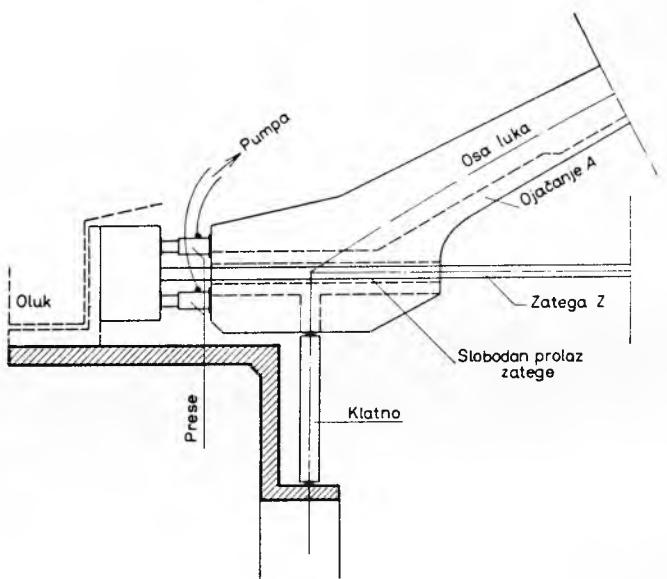
Ideju o ljuskama kao tankim svodovima, ukrućenim rebrima kako bi mogli primiti momente savijanja od pokretnog opterećenja i bez opasnosti izvijanja, prate lepa ostvarenja Freyssinet-a već

slučajnih opterećenja. U preseци 1-1 i 2-2 treba izvršiti pogodnu vezu ljuske i rebra; inače se na ovim mestima javljaju prsline duž rebara. Oblik nosača treba izabrati takav da pod uticajem stalnog opterećenja sistem radi samo kao aksijalan; potportna linija treba da je identična sa linijom sistema. Ovo se može postići u slučaju luka sa zategom samo ako se zatega hidrauličkim presama u rasponu skrati toliko koliko iznosi njeno elastično izduženje i skraćenje luka pod delovanjem aksijalnih sila od stalnog tereta (Δl_e). Dalje je, ukratko, prikazan ovaj noviji postupak mehaničkog poboljšanja naponskog stanja konstrukcijskog sistema.

Na sl. 11 a prikazane su shematski dve prese koje mogu i stezanjem zatege za Δl_e upolje skratiti je u rasponu za isto takvu veličinu. Na sl. 12 prikazano je skraćivanje zatege u rasponu za Δl_e . Kako ono ima isto statičko dejstvo kao i dužina luka »izgubljena« usled njegova skraćenja pod delovanjem aksijalnih sila, ova se operacija naziva kompenzacija. Prese se po obavljanju predviđenih manipulacija uklanjaju. One inače rade paralelno, na istoj pumpi, a polažu se simetrično. Kad se lukovi oslanaju direktno ne temeljne blokove, mogu se uključivati i ekscentrično položene prese u naročito za to pripremljenoj razdelnici. Da bi se kompenziralo smanjenje dužine luka pod delovanjem normalnih sila, u ovakvom se slučaju mogu sem skraćenja raspona izazvati rotacije, okretanja preseka. Skraćenje raspona translacijom preseka u kojem su prese izaziva promenu normalnih sila u sistemu; s njima se znatno menjaju momenti, normalne sile menjaju se beznačajno. Ovim se postupkom, rotacijom, obično vrši rektifikacija sistema. I trans-



Sl. 11



Sl. 12

od početka druge decenije ovog veka. Teorijski radovi Dischinger-a i Finsterwaldera iz kraja druge i početka treće decenije dali su podstrek za veliko obogaćenje oblika sistema ljuski. Zatim se niži kapitalni radovi iz oblasti teorije ljuski, osobito u skandinavskim zemljama i u novije vreme u SSSR, naročito radovi Vlasova. Naša zemlja je takođe dala nekoliko značajnih teorijskih priloga u ovoj oblasti, iz ljubljanske i beogradske grupe za primenjenu i teorijsku mehaniku. Značajna ostvarenja na ovom polju daju Jugoslaviju pravo da se ubraja u zemlje na dosta visokom stupnju razvoja i dostignuća.

Na sl. 11 a prikazana je shema ljuske između nosača na odstojanju nosača za ukrćenje λ , strele f , raspona l i visine hale h do zatege. Debljina ovakvih membrana-ljuski obično je 6 cm; one se armiraju konstruktivnom mrežom armature $\varnothing 6$ cm sa odstojanjima 15 cm u dva ortogonalna pravca. Armatura je ili paralelna izvodnicama i upravna na njih, ili je ortogonalna mreža okrenuta za 45° prema izvodnicama. λ se kreće u dosta širokim granicama, obično od 3 do 6 m. Membrana se razapinje kao svod strele f , između oporačkih greda A i B, i prima samo aksijalno opterećenje; savijanje primaju lukovi; ono se javlja kao posledica delovanja kosih reakcija membrane preko nosača A i B, kao i od delovanja

lacija i rotacija preseka vrše se tzv. sistematizovanim silama: silama određene veličine, određene ekscentričnosti i utvrđena načina promena od početnih do konačnih veličina. Sistematizovane sile izazivaju sistematizovana pomeranja. Između njih postoji zavisnost koja se proračunava po postupcima statike; otuda sistematizovana pomeranja i sile služe kao kontrola jedno drugom. Ova je kontrola u nekim slučajevima neophodna da bi se izbegla katastrofa od preopterećenja tokom procesa.

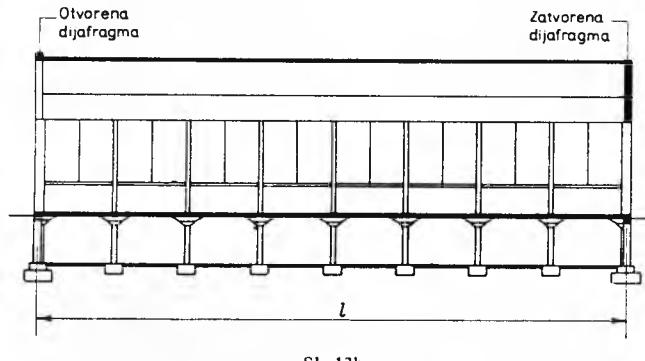
Bitna razlika između kompenzacije i regulacije sastoji se u tome što kompenzacija vraća sistemu izgubljenu dužinu i vraća ga, prema tome, njegovom prvobitnom stanju; regulacija nameće sistemu, po našoj želji, neko novo geometrijsko stanje. Na ove dve statičke radnje, betonski sistem koji se, s vremenom, pod naponima deformiše, reaguje naponskim stinjanjavanjem, teži da se oslobodi nametnutih deformacija, a prima pomeranja orientisana vraćanju sistema prirodnom stanju pre opterećenja. Otuda se rektifikacija mora više puta ponavljati, jer joj se delovanje s vremenom »guši«, a kompenzaciji ne. Zbog skupoće obavljanja ovog posla i dugog trajanja, rektifikacija se ne vrši bez izuzetne potrebe; kompenzacija je dosta česta, — naravno, samo za konstrukcije od većega značaja. Obično se ove radnje vrše na lučnim konstrukcijama. Kod nas

je na gradenju tunel-galerije na Savskom pristaništu u Beogradu sprovedena 1938 u širokim razmerama kompenzacija okvirnih sistema; prema saznanju, jedinstvena uopšte.

U upotrebi ljski kao konstrukcija za pokrivanje velikih površina, napred opisane konstrukcije, često nazivane Kolbovi svodovi, prevazišli su drugi tipovi ljski. Prema geometrijskim karakteristikama, tih novih tipova ima sa jednostrukom i dvostrukom krivinom. Prototipovi su im cilindrične ljske, eliptični paraboloidi, hiperbolični paraboloidi i konoidi.

Na sl. 13a dat je presek cilindrične ljske. Ona je obrazovana translatorynim kretanjem njenog preseka po pravoj, na dužinu raspona l . Za duge cilindrične ljske, kad je $l/\lambda \geq 4$, postoje razlike teorije. Razlika je između njih samo u pogodnosti pronađena rešenja karakteristične jednačine osmog stepena. Bitne karakteristike sistema na sl. 13a b su sledeće: što je ugao φ manji to je ljska plića, više se približava naponskom stanju T-preseka prema Navierovu načinu prikazivanja; obrnuto, sve više se izražava oblik ljske i njegovo membransko naponsko stanje ukoliko je ugao φ veći; glavni statički uticaji su posledica oslanjanja sistema na rasponu l ; oslanjanjem ljski preko srednjih i krajnjih rebara, tipa I i II, dobijaju se aksijalne N -sile i momenti; ovi su veoma mali u odnosu na glavni pravac, ali su zbog malih debljina ljski naponi značajni. Da bi se dobila prava naponska slika, treba iz normalnih napona σ_x i σ_y ($\sigma_z = 0$) i smičućih napona τ_{xy} u

zličite teorije. Razlika je između njih samo u pogodnosti pronađena rešenja karakteristične jednačine osmog stepena. Bitne karakteristike sistema na sl. 13a b su sledeće: što je ugao φ manji to je ljska plića, više se približava naponskom stanju T-preseka prema Navierovu načinu prikazivanja; obrnuto, sve više se izražava oblik ljske i njegovo membransko naponsko stanje ukoliko je ugao φ veći; glavni statički uticaji su posledica oslanjanja sistema na rasponu l ; oslanjanjem ljski preko srednjih i krajnjih rebara, tipa I i II, dobijaju se aksijalne N -sile i momenti; ovi su veoma mali u odnosu na glavni pravac, ali su zbog malih debljina ljski naponi značajni. Da bi se dobila prava naponska slika, treba iz normalnih napona σ_x i σ_y ($\sigma_z = 0$) i smičućih napona τ_{xy} u



Sl. 13b

nizu tačaka konstrukcije naći glavne napone σ_1 i σ_2 i konstruisati trajektorije glavnih napona. U zategnutim delovima preseka armaturu se računa iz intenziteta glavnog napona zatezanja i debljine na mestu uočene tačke. Pravac armature treba da dovoljno dobro prati trajektoriju glavnog napona zatezanja; armatura upravna na ovu trajektoriju je podeona ili montažna armatura; najviše armature smešteno je u rebru širine b_0 . Na sl. 13b prikazana je slobodno oslonjena cilindrična ljska sa dva tipa dijafragmi. Levi tip je otvoren za propuštanje svetlosti, desni je zatvoren. Prvi su uveli Francuzi, drugi Nemci. Konstruktori sve radije primenjuju otvoreni tip, i iz ekonomskih i iz estetskih razloga. Krajnje rebro ljske mora da se udalji od spoljnog zida, kako bi moglo da se deformiše u pravcu osa y i z . Greške nastale uništenjem ove slobode dovodele su do pucanja ljski.

Glavni statički sistem ljski u pravcu ose x , prirodno, može biti kao i u linijskom sistemu. Prosta greda, prikazana na sl. 13b, može se produženjem ljski preko oslonaca pretvoriti u gredu sa prepustom; postavljanjem ljski raspona l u nizu, sa monolitnim spojem nad osloncem, dobili bi se kontinualni sistemi itd. Dijafragme su uvek neophodne nad osloncem. Opterećenje sa ljski prenosi se otporom smicanja po stranama dijafragmi na oslonce. Kontinuitet ljski ne donosi mnogo u ekonomiji. Kako su kontinualne ljske zategnute nad osloncima i na temenu, ljske pro-

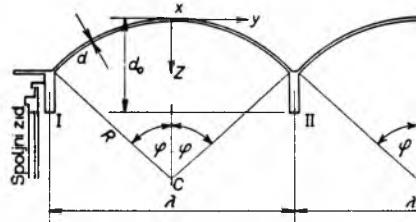
računate po fazi IIa dobijaju prsline na mestu koje je vrlo nepodgodno za izolaciju od prodiranja kiše. Dobro izvedene ljske, bez prsline nastalih iz bilo kojih razloga, mogu ostati bez ikakve izolacije. Kontinualne su ljske, sem toga, zbog znatne visine d_0 u odnosu na l , dosta osetljive na nejednakost sleganje oslonaca; isto tako su zbog neznatnih debljina vrlo osetljive na nejednakost zagrevanja pojedinih slojeva preseka, prema njihovoj izloženosti uticaju sunca.

Mesto armiranja klasičnom armaturom, u poslednje se vreme kod nas izvodi prethodno naprezanje kablovima. Tehnika prethodnog naprezanja zahteva rigorozno proračunavanje sistema, uvođenjem sila kablova kao spoljnih sila u igru unutarnjih sila. Na taj način dobijene konstrukcije mogu biti bez prsline za normalna stalna opterećenja, sneg i veter. Kontinualni sistemi mogu još uvek nejednakim sleganjem i temperaturnim uticajima biti doveđeni u stadij IIa, tj. mogu se pojaviti prsline na njima. Temperaturni se uticaji mogu proceniti doista tačno, pa se u prethodnim naprezzanjima mogu i takva naponska stanja zatezanja apsorbirati pritiskom kablovima. Zatezanja od nejednakog sleganja samo se približno procenjuju; kvalitativno, njihove veličine može geometrija da definiše dovoljno tačno ako su izvršena dovoljno iscrpna istraživanja.

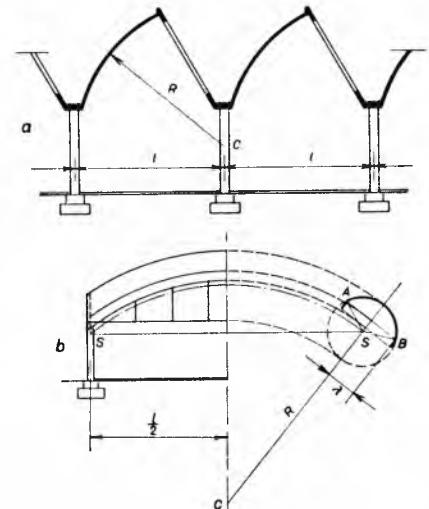
Cilindrična ljska može se obrazovati na vrlo velik broj načina. Razni zahtevi funkcionalnog, arhitektonskog i estetskog reda utiču na ove oblike. Česta je cilindrična konstrukcija oblika šed; najčešće kontinualna preko više oslonaca. Na sl. 14a prikazana je skica ovakva šed-krov sa kontinualnom cilindričnom ljskom preko više oslonaca. Na sl. 14b prikazana je skica ljske u obliku odsečka torusa. Ova se konstrukcija može obrazovati i translatorynim kretanjem segmenta $A-B$ u vertikalnoj ravni po liniji $S-S$. U torusnoj konstrukciji segmentna ljska se dobija za preseke u ravni koja prolazi kroz C ; vertikalne ravni sekut torus po elipsama. Za slučaj dobijanja ljske translatorynim kretanjem segmenta $A-B$, preseci u vertikalnoj ravni su segmenti, a radijalnoj ravni elipse. Kad je $l/2\lambda$ dovoljno veliko, za napone je od neznatnog uticaja koja je od ovih alternativa usvojena. Za oplatu to nije bez značaja; druga alternativa — translacijom obrazovana ljska — ima prednosti. Željeznička stanica u Sarajevu ima ovakav tip ljski, samo su temena spuštena dole. Tako je ljska između glavnih rebara u stanju zatezanja; u upravnom pravcu sudjeluje sa glavnim nosačima kao prostorna konstrukcija.

Dijafragme koje ukrućuju ljske na krajevima mogu se stavljati češće, no to umanjuje ekonomičnost konstrukcije. Dovoljno često postavljene dijafragme, npr. na konstrukciji sa sl. 13, čine da prikazani presek pri naprezzanju ostane nepromenljiv u pogledu elastičnih deformacija. U takvu slučaju ne treba proračunati konstrukciju uopšte po teoriji ljski, već po teoriji proistekloj iz klasičnih pretpostavki, primenjenoj na kompaktnim presecima. Analiza napona bi se lakše vršila grafičkim postupcima.

Napred opisane konstrukcije ljski spadaju u krivolinijske sa jednogubom i krivolinijske sa dvogubom krivinom. U drugom su slučaju obe krivine konstantne za karakteristične ravni. Kao prototip promenljivih krivina, a i često primenjivih ljski, prikazuje se eliptični paraboloid. Na sl. 15b prikazana je pravougaona osnova hale koja se pokriva ljskom tipa eliptičnog paraboloida. Na sl. 15a prikazan je duži presek hale; bitnih razlika u presecima nema, samo je drugi odnos strele i raspona u drugom pravcu;



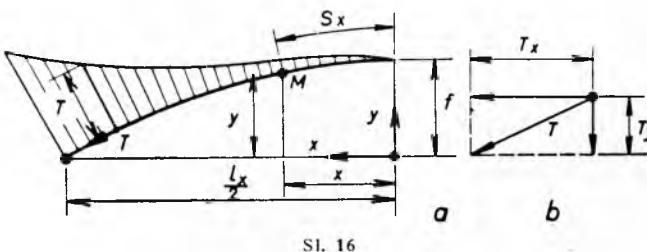
Sl. 13a



Sl. 14

strela f se obično zadržava ista, a rasponi se razlikuju prema nameni hale. Opterećenje od krova hale prenosi se smičućim silama na dodiru ljske i luka (L), koji ima ulogu dijafragmi; preko luka sa zategom (Z) prenosi se opterećenje na stube (S), sa njih na temeljne stope, odavde na tlo. Ovakvim se ljkama mogu pokrivati vrlo velike površine samo sa četiri stuba na uglovima osnove ljski. Ovo je rešenje onda na mestu kada su na sve četiri osnove potrebeni slobodni otvor. Kada su, međutim, ove strane fasadni zidovi, nije potrebno graditi dijafragme u obliku luka sa zategama. Tada se može kao dijafragma izvesti kontinualna greda oslonjena na fasadnim stubovima. Razlika u ekonomiji ova dva rešenja vrlo je velika, i ne treba izvoditi fasadne stube nezavisne od

krovne konstrukcije. Na sl. 16a prikazan je dijagram sila smicanja ljske na polovini luka. Sile smicanja imaju pravac tangenata na osu sistema. Na sl. 16b prikazana je sila smicanja na jedinici dužine veze



Sl. 16

ljske i luka; prilikom statičke analize dijafragme, da bi se operisalo sa ortogonalnim koordinatnim sistemom, razlaže se sila T u T_x i T_y . Sile T_y deluju sa stalnom težinom na lučnoj konstrukciji kao gravitacione sile; zajedno sa njima izazivaju pozitivne momente osnovnog sistema; sile T_x deluju upravno na gravitacione sile, ali one izazivaju isto tako pozitivne momente na osnovnom sistemu. Moglo bi se napisati da je u uočenoj tački moment $M_x = M_0 + M_{Tx} + M_{Ty}$. Poznato je da je sila u zatezi zadata sa

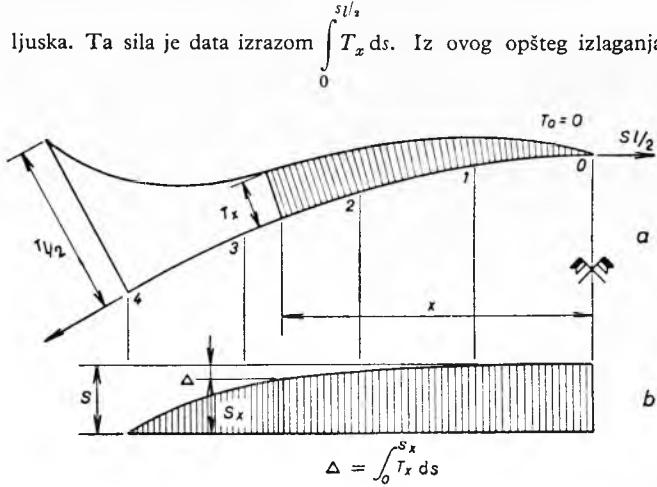
$$H_z = \psi \int_0^s \frac{M_x ds}{E J_x} : \int_0^{y^2} \frac{ds}{E J_x}.$$

Sem toga, iz uslova ravnoteže dobija se da je $\int_0^{s_{x(y)}} T_y ds = G_{x(y)}$.

U ovim izrazima je ψ funkcija koja zavisi od odnosa geometrijskih elemenata lučnog sistema. Njom se regulišu uticaji normalnih sile na deformacije sistema; $E J_x$, proizvod modula elastičnosti i momenta inercije, specifična je krutost za savijanje; $G_{x(y)}$ je opterećenje od ljske koliko otpada na jedan luk raspona x , odnosno y . Ovaj odnos služi kao kontrola proračuna. Sila u zategi H_z , kad je dijafragma u obliku luka sa zategom, ima tri dela: od opterećenja samoga luka, od komponente T_x i od komponente T_y . Sve su komponente istoga veličinskog reda; jednina ne može biti zanemarena u odnosu na druge dve. Po luku dijafragmi normalne se sile znatno

brže menjaju no na običnim lukovima. U temenu je luka normalna sila samo od opterećenja samog luka i komponente T_y ; od temena do oslonca se ovoj normalnoj sili dodaje $\int_0^{s_x} T ds$ za uočenu tačku

M . (Vidi sl. 17). Ako se opterećenje umesto luku predaje fasadnoj konstrukciji, zatega je smeštena u samom elementu kojim se vezuje ljska. Ta sila je data izrazom $\int_0^{s_x} T_x ds$. Iz ovog opštег izlaganja



Sl. 17

može se zaključiti da je rešenje sa prenošenjem opterećenja spojnim elementom direktno na fasadne zidove mnogo ekonomičnije, jer sila S iznosi samo deo sile H_z . Luk dijafragma se nameće na hangarima, kad jedna fasada treba da je slobodna za smeštaj vrata; sem toga, kada je osnova ljski samo deo osnove koja se pokriva. Na sl. 18 predstavljena je shema ovakvog rešenja.

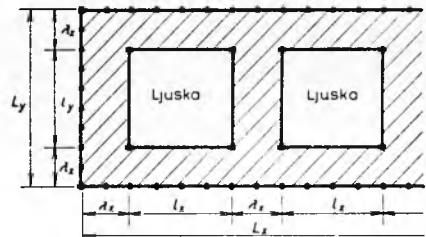
Ljske su, što se tiče potrošnje betona i čelika, vrlo racionalne konstrukcije. Dijafragme su elementi objekta koji su skupi, osobito ako luk ima zategu. Obično sama zatega košta više no luk; svi lukovi sadrže materijala kao ostali deo konstrukcije.

Zbog susticanja opterećenja u uglove, sile T znatno rastu prema njima. Otpornost betona protiv smicanja nije znatna, zato se ljska obično pojavljava na dodiru sa dijafragmom; površina na kojoj se ojačanje vrši prikazana je na sl. 15b. Kada se ona sprovodi

samo na neophodnoj dubini ljske, sa pojačanjem proporcionalnim veličinama sile T . Na istoj slici površina ojačavanja ilustruje ovo ekonomisanje u masi betona; ali ona, svakako, otežava izradu oplate.

Pripravom proračuna ovih konstrukcija obično se iz membranskog stanja napona računaju normalne i smičuće sile u odabranom broju preseka jednog kvadranta celoga sistema. Za simetrično opterećenje konstrukcija je simetrično napregnuta, pa su i geometrijski elementi konstrukcije simetrični. Vetar, međutim, remeti ovu simetriju, ali su njegovi uticaji često beznačajni za samu ljsku; njihov se uticaj obično ceni i prema tome ojača konstrukcija po celoj površini. Iz sila N_x , N_y i T_{xy} računaju se glavni naponi preseka i prema njima polaze armatura u ortogonalni sistem zatezanja i pritisaka.

Ivične dijafragme remete membransko stanje; posledica je toga da se u blizini dijafragmi pored normalnih sile javljaju i momenti savijanja, a kao posledica ovih momenata i transverzalne sile. Proračun ovih momenata i transverzalnih sile vrši se uz pogodne pretpostavke, koje treba da uprošćuju proračun a da daju dovoljno tačne vrednosti ovih uticaja. Proračun se znatno otežava ako se naponska analiza ovakvih sistema vrši po opštoj teoriji;



Sl. 18

ona pored aksijalnih sila N_x, N_y i sila smicanja T_{xy} uvodi u račun i moment savijanja sa konsekventnim transverzalnim silama i momente uvijanja. Ova tzv. momentna teorija, za razliku od bezmomentne, membranske teorije, često nema rešenja za pojedine ljsuske, a sem toga je proračunavanje skopčano sa vrlo dugim radom. Otuda je u primeni aproksimacija: membranska teorija sa uvođenjem uticaja smetnji membranskom delovanju koje potiču od ivičnih nosača.

Plitke ljsuske u statičkom su smislu one čiji se diferencijal luka bez osetne greške može zameniti projekcijom na ravan xy . Ova pretpostavka vodi za izvesne ljsuske eksplicitnom rešenju zadatka; ovome se često pribegava i u opisanom slučaju ljsuski u obliku eliptičnog paraboloida.

U pogledu izvođenja eliptični paraboloid ima nedostatak; oplata se teško geometrijski određuje na gradilištu; sem toga, sa promenom l i f menja se i krivina, pa se ne može upotrebiti ista oplata na drugoj ljsuci, kojoj su promjenjeni raspon i strela. Ako je, međutim, ljsuka deo lopte, može se iz lopte povoljno izabrana poluprečnika sagraditi znatan broj raznih koncepcija ljsuski koje zadovoljavaju postavljeni zadatok. Bitna geometrijska razlika između eliptičnog paraboloida i dela lopte je u tome što preseci paraboloida sa ravnicima zx i zy daju parabole, a preseci lopte, kružne segmente; ravan xy u prvom slučaju seče ljsuku po elipsama, u drugom slučaju po krugovima. Već je iz ovih svojstava jasno da je geometrijsko predstavljanje na gradilištu mnogo jednostavnije za ljsuske koje su delovi lopte. Poznato je da se plitke parabole i odgovarajući im kružni segmenti bitno ne razlikuju u stvarnosti, iako imaju bitno različite matematičke definicije. Ove se činjenice iskorišćuju kako za uprošćivanje računa tako i pri ostvarivanju objekta. Pri građenju halâ Beogradskog sajma oplata kao deo lopte upotrebljena je dva puta, na dva razna tipa kupola; ona je pre toga već bila upotrebljena u Lozniči na jednom trećem tipu.

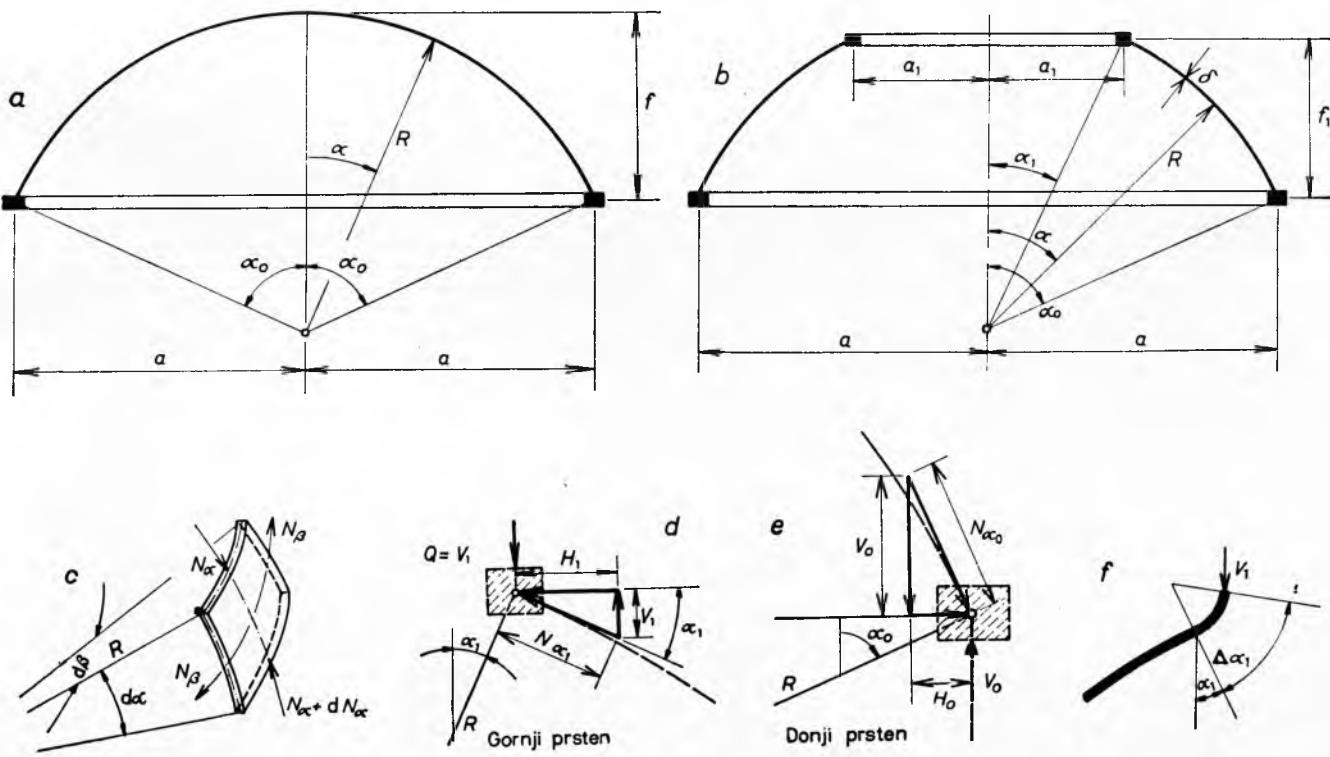
Od ekonomskog je značaja da se nađe racionalno rešenje za što manju potrošnju materijala i rada na fundiranju objekta. Za pojevtinjenje temelja od interesa je što su ljsuske u obliku eliptičnih paraboloida, ili njihovih zamena u obliku delova odsečaka površine lopte, relativno malo osetljive na dosta znatna nejednaka sleganja. Sem toga, za pojevtinjenje armature za prijem napona zatezanja u ljsuski, ili zategama, mogućna je upotreba kablovskog čelika. Uvođenje kablovskih sila prethodnog naprezanja u sistem ne remeti

znatno prirodno naponsko stanje bez prethodnog naprezanja. I jedno i drugo opažanje potvrđeno je eksperimentalnim istraživanjima i na modelima i na izvedenim objektima. Prethodno napregnutе zatege zahtevaju vrlo male količine betona za prijem sila iz kablova. Sila u zatezi od snega i veta je neznatna u odnosu na ukupnu silu. Samo taj deo sile nije primljen aktivnim potiskom konstrukcije. Potrebna količina betona za prihvatanje neprimljene sile iz kablova od prelaznog opterećenja redovno je čak i manja od količine betona neophodne za obrazovanje preseka zatega od klasičnog betona. Kako se kablovi mogu kroz zategu voditi spolja, bez cevi, a zabetonirati radi zaštite od korozije posle zatezanja, to je odnos jedinične cene kablova i opreme u odnosu na jediničnu cenu klasične armature 2,2 : 1. Moć nošenja kablova i klasične armature odnose se približno kao 5 : 1. Otuda su prethodno napregnutе zatege oko dva puta racionalnije od klasične armature. Neosetljivost ovakvih ljsuski na nejednaka sleganja omogućuje racionalno direktno fundiranje. Nejednaka sleganja, ako su mala, ostavljaju se sistemu da ih sam savlada; ako su veća no što bi sistem mogao bez ozleda da podnese, vrše se »nivelanja« oslonaca hidrauličkim presama.

Rotacioni površinski sistemi. Veliki broj površinskih nosača nastaje obrtanjem oko određene ose jedne duži neke geometrijski određene linije. Okretanjem kruga oko jednog prečnika kao ose dobija se lopta. Ako se oko ose obrće jedna prava izvodnica koja leži u jednoj ravni sa osom i zaklapa sa njom određen ugao α , dobija se konus. Zarubljivanjem se može obrazovati otvoreni konus. Obrće li se oko određene ose prava koja je ne seče, dobija se rotacioni hiperboloid. U odnosu na troosni sistem, izvodnica rotacionog hiperboloida zaklapa uglove α, β i γ . Od izbora ovih uglova i najmanjeg normalnog odstojanja izvodnice od ose rotacije zavise geometrijski oblici i statičke osobine ovako obrazovanog površinskog nosača. Iz samog načina nastajanja rotacionog hiperboloida vidi se da je on jednostavan za oplaćivanje, jer su mu izvodnice prave; sem toga se po ovim izvodnicama mogu voditi pravi kablovi, ako takvi bolje služe svrsi.

Rotacioni površinski sistemi vrlo su omiljeni u arhitekturi i industrijskom građevinarstvu: za krovove i za tornjeve za hlađenje vode provetrvanjem mlazeva.

Kad su ova rotaciona tela monolitna, delovanje konstrukcija je prostorno. Od radialnih elemenata mogu se obrazovati rotacione kupole; one se tim konstruktivnim postupkom mogu svesti na



to da, za proračun dovoljno tačno, rade kao linijski sistemi u ravni.

Naziv površinskih nosača u obliku ljski potiče iz zamišljene analogije sa ljskom jajeta. U slučaju jajeta poluprečnika upisane lopte 25 mm, kada je debljina kore samo 1/4 mm, odnos je debljine prema poluprečniku krivine $v = \frac{1}{4.25} = \frac{1}{100}$. Ima projektovanih ljski, do detalja razrađenih, a sličnih i izvedenih, čiji odnos daje mnogo vikiju konstrukciju od betona no što je ljska jajeta:

$R = 80 \text{ m}; \delta = 0,10 \text{ m}$, odnos je $v = \frac{1}{10 \cdot 80} = \frac{1}{800}$. Naponi u betonu nisu pri tom iskorisceni, konstrukcija se proračunava iz uslova elastične stabilnosti, da se ne izboči.

Tipičan predstavnik rotacionih sistema je kupola, i to kupola kao odsečak lopte. Redi je slučaj da je rotacioni sistem deo rotacionog elipsoida; bilo da elipsa rotira oko veće bilo oko manje osi. Kad rotira oko velike ose, dobija se jajast elipsoid i visoka kupola; kad rotira oko male ose, dobija se spljošteni, geoidni oblik. Mogu se rotirati i druge krive za dobijanje rotacionih površina. Rotiranjem kruga dobija se lopta. Odsecanjem njenih kalota koordinatnom ravni x y dobija se zatvorena kružna kupola. Odsecanjem manje kalote od veće, veća biva otvorena odozgo; tako se obrazuje otvorena kupola, sa mogućnošću da otvor služi za osvetljavanje ili za druge svrhe. Na sl. 19 prikazana su ova dva tipa kupole. Njihovi su geometrijski podaci: u slučaju pune kupole, ugao otvora kupole, $2\alpha_0$, i R ; u slučaju otvorene još i ugao otvora, $2\alpha_1$. Ovi podaci daju za raspon kupole $2a = 2R \sin \alpha_0$; otvor kupole $2a_1 = 2R \sin \alpha_1$. Strela, dubina kupole, iznosi $f = R(1 - \cos \alpha_0)$, odnosno $f_1 = R(\cos \alpha_1 - \cos \alpha_0)$.

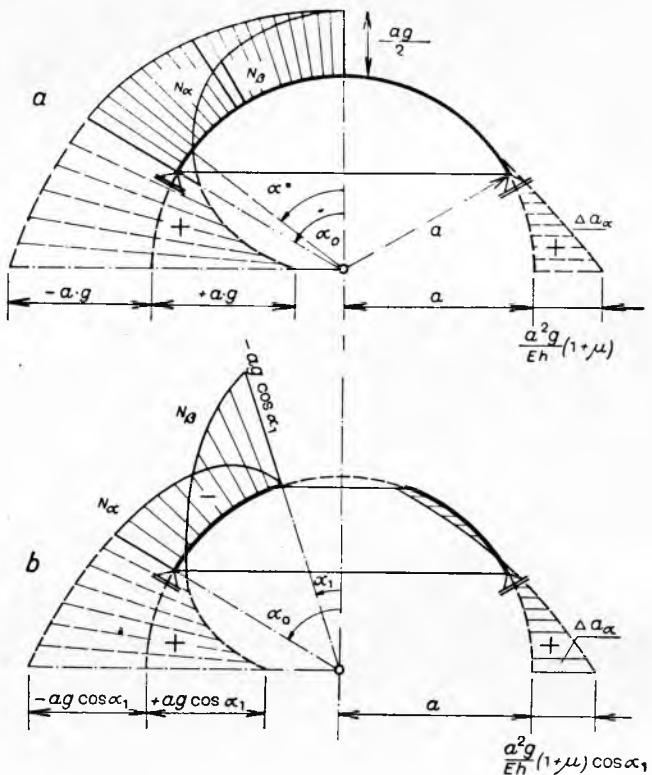
Na sl. 19 a-f date su geometrijske i konstruktivno-statičke pojedinosti ova dva slučaja. Zatvorena kupola ima oslonički prsten koji prima horizontalne komponente normalne sile; one teže da »razvuku« prsten. Sila zatezanja u ovom prstenu iznosi, ako se primeni »kotlovske« obrazac, $Z = aN_{\alpha_0} \cos \alpha_0$. Otvorena kupola ima još i gornji prsten; njime se prihvataju sile N_{α_1} ; one teže da »zatvore« otvor kupole. Sila pritiska u gornjem prstenu iznosi $D_1 = a_1 N_{\alpha_1} \cos \alpha_1$. Često je α_1 vrlo malen ugao; od sile na jedinicu dužine prstena, V_1 , dobija se normalna sila N_{α_1} , kako se vidi sa sl. 19 d, iz $V_1/N_{\alpha_1} = \sin \alpha_1$, odnosno $N_{\alpha_1} = V_1/\sin \alpha_1$. Za male uglove α_1 dobijaju se mali sin α_1 , odnosno velike normalne sile; u tom se slučaju preporučuje »uvodenje« sile V_1 u kupolu preko specijalno obrazovanoga prelaznog dela, prikazanog na sl. 19 f.

Armiranje gornjeg prstena vrši se kao i centrično opterećenih stubova. Donji se prsten armira kao centrično zategnuti element. Ljska kupole opterećena je samo centričnim silama N_{α} i N_{β} . Prva od njih naziva se meridijanska sila na jedinicu širine, druga ekvatorijalna. N_{α} je uvek pritisak, N_{β} može biti u nižim presecima i zatezanje. Na sl. 20 a nacrtani su dijagrami N_{α} i N_{β} za punu kupolu opterećenu sopstvenom težinom. Na sl. 20 b prikazani su isti dijagrami za otvorenu kupolu. Iz dijagrama sila N_{α} i N_{β} za otvorenu kupolu može se zaključiti da se ona može graditi od blokova tako da se zida, po projektovanom profilu, venac za vencem, bez skela. Tako je bio sagraden i Panteon u starom Rimu. On je, naravno, graden po intuiciji, bez ikakva matematičkog dokaza za njegovu stabilnost. Statika je tek nešto pre 100 godina u osetnom razvoju, a njeni počeci nisu u mnogo oblasti uopšte stariji od 150 godina. Poslednjih 30 godina najviše je uradeno u oblasti površinskih nosača. Ova činjenica utvrđuje značaj intuicije za stvaranje i u građevinarstvu; stoga je ono dugo smatrano za umetnost.

Sa sl. 19 može se uočiti da donji, oslonički prsten postaje izlišan kad je centralni ugao $\alpha_0 = \frac{\pi}{2}$. Tada je $\cos \alpha_0 = 0$, a sila u prstenu, prema napred datom izrazu, $Z_0 = aN_{\alpha_0} \cos \alpha_0 = 0$. Za plitke kupole je i N_{α} i N_{β} pritisak. Naponi u osloničkom, donjem prstenu uvek su zatezanja. Od sila pritiska u ljsici kupole deformacije su skraćenja ϵ_p , u prstenu su izduženja ($-\epsilon_p$); međutim, na dodiru kupole i prstena deformacije moraju biti iste i po znaku i po veličini. Prsten ometa membransko delovanje kupole. Zato se i vrši dopuna membranskog naponskog stanja; dopuna je posledica monolitne veze kupole i prstena kao i toga što one imaju, pri zadatom opterećenju, različita stanja deformacija. Kaže se da

ne ispunjuju potrebne uslove kompatibilnosti. Iz zahteva zadovoljenja tih uslova dobijaju se potrebni izrazi za dopunu naponskog stanja. U najvećem delu kupole naponska stanja su membranska, dakle naponi iznose $\sigma_{\alpha} = N_{\alpha}/\delta$, i $\sigma_{\beta} = N_{\beta}/\delta$, gde je δ debljina zida kupole. Samo u uskoj neposrednoj blizini prstena nastaju nemembranski uticaji.

Kupole uopšte, a posebno plitke, proračunavaju se gotovo uvek samo za rotaciono-simetrična opterećenja, npr. za težinu kupole i pokrivača snega na kupoli. Za takva su opterećenja smičuće sile $T_{\alpha\beta} = 0$. Vetur nije rotaciono simetrično opterećenje, od njega ima smičućih sila u kupolnoj membrani; naponi od tih sila, $\tau_{\alpha\beta} = T_{\alpha\beta}/\delta$, obično su daleko niži od dopuštenih smičućih napona za armirani beton i zato se i ne proračunavaju; sem toga, proračun ovih uticaja nije jednostavan kao onih od rotaciono-simetričnih opterećenja, pa se ne obavlja bez potrebe.



Sl. 20

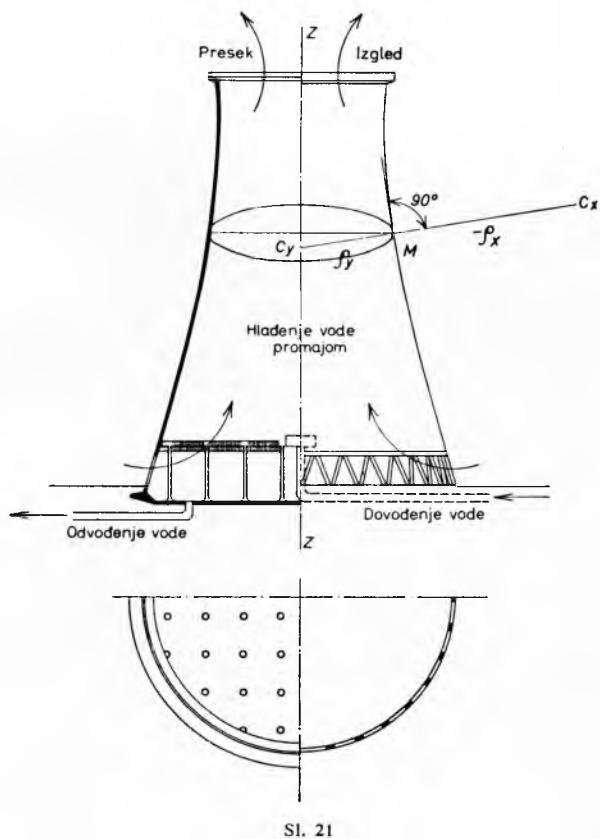
Proračun svih vrsta konstrukcija ljski u obliku krivolinijskih površinskih nosača vrši se pod pretpostavkama: 1. da su preseci ljski u odnosu na ostale dimenzije konstrukcija dovoljno mali, tako da se ljske ponašaju kao membrane, tj. primaju samo aksijalne sile i sile smicanja paralelne sa tangentama memorana; 2. da su pomeranja mala pod delovanjem membranskih sila u odnosu na ostale dimenzije sistema konstrukcije, sem u odnosu na njezinu debljinu, i da ona ne menjaju aksijalna naponska stanja i smicanja paralelna sa tangentama membra, drugim rečima, geometrijski se elementi ljski tokom opterećenja zadržavaju ne-promenljivi. Iz ovoga se vidi da se ljske proračunavaju po teoriji prvoga reda; pomeranja srednje ravni sistema ne deluju na uticaje ljske pod opterećenjem. Proračuni se sprovode i pod pretpostavkom linearne zavisnosti između opterećenja i izazvanih uticaja, odnosno pod pretpostavkom čiste elastičnosti. Tokom Španjolskoga građanskog rata, kao i tokom Drugoga svetskog rata, zapaženo je da ljske kao površinski sistemi nosača trpe od nasilne promene geometrijskog oblika. Pokriveni stadion za tenis u Madridu dobio je pun pogodak manje bombe. Ljska ga je izdržala sa prodom kroz nju i ozledenom oblasti od oko 4 m^2 , ali su s vremenom štetni uticaji od ozlede, promenom geometrijskog oblika, progresivno vodili konačnom lomu, koji je posle nekoliko dana i nastao. U mnogo industrijskih zgrada u Nemačkoj, pokrivenih kontinualnim cilindričnim šed-ljskama, srušila su se cela dilataciona polja;

to se događalo pod progresivnim porastom parazitnog uticaja od promene početnoga geometrijskog oblika kao posledice lokalne ratne ozlede.

Sve se više u svetu uvode postupci proračuna konstrukcija zasnovani na osobinama plastičnog tečenja materijala. Za one sisteme u kojima unutrašnje sile nisu bitno zavisne od njihova početnoga geometrijskog oblika, mnogo je jednostavnije obraditi teoriju zasnovanu na plastičnom tečenju materijala. Primena plastične teorije na ljske, prema tome, znatno se otežava značajnošću promena početnih geometrijskih elemenata ljske; kad ljska uđe u stanje plastifikovanja, morala bi se primeniti teorija drugoga reda. Zanimljivo je što se, u dosta praktičnih slučajeva, ideje iz čeličnih konstrukcija o proračunu po stadijumu loma jednostavno prenose i na proračune sličnih betonskih konstrukcija. Beton ima bitno drukčije osobine nego čelik; osobito mu nedostaje znatnije plastično tečenje bez promene napona; iz tih razloga zakon superpozicije nosivosti do iscrpenja svih elemenata uočenog preseka ponekad nije primenljiv bez osetna odstupanja od stvarnosti.

Dosad prikazane ljske kao sistemi površinskih nosača imale su pozitivnu Gaussovou krivinu, $1/\rho_x \rho_y$. Konstrukcije u obliku sedla imaju ovu karakteristiku negativnu, jer ρ_x ima, po geometrijskim definicijama za znak radijusa krivine, suprotan znak od ρ_y . Hiperbolični paraboloidi i neke vitoperne površine također imaju ovu geometrijsku osobinu. Za armirani beton su one manje pogodne nego sistemi sa pozitivnom Gaussovom krivinom. One sa negativnom krivinom imaju znatne delove površina ljski zategnute; to armiranom betonu manje odgovara. Često se takvi sistemi izvode od dva razapeta sistema kablovskih užadi i od prefabrikovanih elemenata koji se preko njih stavljuju; time se obrazuju krovne površine. Za razliku od razuprtih konstrukcija, koje u obliku svodova dobro odgovaraju betonu kao materijalu, konstrukcije sa kablovima su obešene, slobodnog, lančanog tipa, ili oblika regulisanih kablovima drugoga pravca; njihova krivina, obično, ima znak suprotan znaku krivine prvog pravca. Kaže se za prve da se klasično, a za druge da se antiklasično oslanjaju.

Od prirode statičke funkcije jednog sistema zavisi njegova prilagodenost postavljenom zadatku. Vertikalni rotacioni hiperboloid, kako je ranije rečeno, nastaje obrtanjem koso postavljene prave oko vertikalne ose. Izborom parametara α , β , γ i p , tj.



Sl. 21

uglova i najmanjeg odstojanja prave od ose rotiranja, dobija se željeni oblik hiperboloida, prema njegovoj radnoj nameni. Ovakvi oblici ljski upotrebljavaju se za konstruisanje tornjeva za hlađenje vode. Na sl. 21 u tački M na rotacionom hiperboloidu krivine su suprotog znaka. Ovaj konstrukcijski sistem ima vrlo dobre osobine i u namenskoj i u statičkoj funkciji. Njihov oblik vrlo dobro deluje estetički; to je još jedan znak da u punoj meri odgovaraju nameni. Vazduh struji kroz potporni rešetkasti sistem koji leži u tangencijalnoj ravni oslončačkog prstena rotacionog hiperboloida. U ovakvim tornjevima pojavljuju se naprezanja samo od sopstvene težine kule, od veta i temperaturnih promena, zavisnih od meteorooloških uslova i strane osunčanja. Ovi su uticaji osobito jako izraženi na dodirnom preseku sa prstenom preko rešetkastoga oslončačkog sistema. Na tom su delu, sem toga, izraženi i nemembranski naponi. Ovi se objekti grade i u cilindričnom obliku. U tom slučaju je izvodnica paralelna sa osom rotacije; neki su uglovi jednak nuli, drugi $\pi/2$, $p = R$, gde je R poluprečnik cilindra. Cilindar se javlja kao granični slučaj rotacionog hiperboloida.

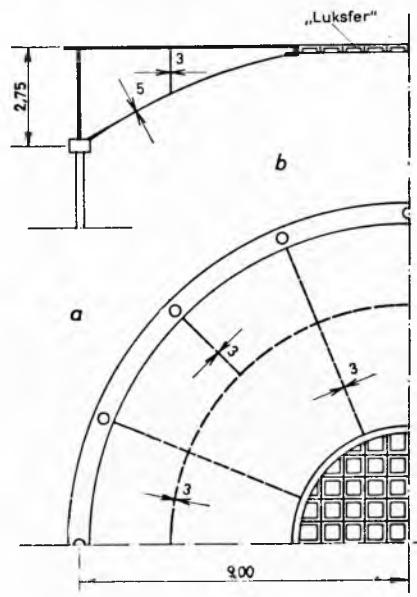
Tehnika izvođenja rotacionih hiperboloida vrlo je različita. Od nje umnogom zavisi koštanje ovih objekata; oni mogu katkada biti vrlo značajnih dimenzija, i do 100 m visine. Po načinu postanka rotacionih hiperboloida, oni se mogu oplaćivati po izvodničkoj pravoj, pravim daskama bez vitoperenja; ova se osobina katkada može iskoristiti i za vodenje pravih kablova, u slučaju kada je potrebno njihovo prethodno naprezanje. Cilindrični hladnjaci se izvode najracionalnije klizajućom oplatom. Opšta je tendencija prilikom građenja ovih velikih objekata izbeći upotrebu skela; pogotovo kad njihova zapremina često doseže i više stotina hiljada kubnih metara, a skela je donekle proporcionalna sa ovom kubaturom. Jugoslavija raspolaže sa više montažnih sistema za građenje ovih hiperboloida, a pored toga i sopstvenim sistemom klizajuće oplate za građenje cilindričnih tornjeva za hlađenje.

Konstrukcije ljski mogu se proračunavati samo za opterećenja kontinualno podeljena po površini ljske. U našoj zemlji postoji jedinstvena građevina u kojoj rotaciona kupola prima linijska opterećenja posredstvom pogodno odabranog sistema dijafragmi. Osnovna ideja o mogućnosti postojanja i ovake konstrukcije leži u zajedničkom, konjugovanom radu kupole i tavanice restorana iznad nje; ona se preko rebara u obliku dijafragmi oslanja na ljsku. Naročit oblik mreže neobično tankih dijafragmi, izrađenih preko otvorene kupole, trebalo je da svede lokalna savijanja u kupoli na one vrednosti koje se javljaju i na mestima gde granični uslovi

nameću savijanje ljski. I posle bombardovanja ljska je ostala bez ikakvih znakova ozlede. Na sl. 22a prikazana je osnova kupole sa rasporedom dijafragmi, na sl. 22b presek kupole. Mreža dijafragmi je jednovremeno i shema linijskog opterećenja kupole. Kupola je, za potrebe noćnog lokala, izbušena otvorima za smeštaj reflektora.

PRIMENA ARMIRANOG BETONA

Armirani beton u građevinarstvu. U građevinarstvu, u širem smislu, armirani beton našao je najraznovrsnije primene. Mnogi elementi od kamena, čelika i drveta, vekovima primenjivani u građevinarstvu, zamjenjuju se armiranim betonom. Pri tome je, pored odgovarajuće statičke i konstrukcione funkcije, elemen-



Sl. 22

timu od armiranog betona postignuta veća ekonomija, a u odnosu na čelik i drvo još trajnost i postojanost na visokoj temperaturi. Neki od tih elemenata čine cele gradevinske objekte. Takvi su dalekovodski stubovi, stubovi za nošenje užadi žičanih železnica, razni jarmovi u skelama ili provizornim konstrukcijama itd. Tehnika fundiranja gradevina široko iskorištava armirani beton, bilo da se izrađuju od njega elementi kojima se izvršava fundiranje ili da su celi delovi temeljne konstrukcije od armiranog betona. Među elementima upotrebljivanim u fundiranju svakako su šipovi od armiranog betona od vrlo velikog značaja već od početka ovoga stoljeća. Sem šipova rade se i talpe za obrazovanje nepropusljivih podgrada temeljnih jama; izrada pribroja i zagata od armiranog betona svaki dan je sve češća. U nas je pogotovu opravданo očekivati i dalji napredak u primeni armiranobetonskih zagata, jer mi još ne proizvodimo čelične talpe; drvo je postalo tako skupo da se sve više isplaćuje upotreba talpi od armiranog i prethodno napregnutog betona. Kesoni za pneumatičko fundiranje, koji su sami za sebe vrlo interesantni konstruktorski objekti, danas se mnogo češće izrađuju od armiranog ili prethodno napregnutog betona nego od čelika.

U gradenju industrijskih objekata, za najraznovrsnije delove konstrukcija primenjuje se klasično armirani beton i beton sa prethodnim naprezanjem. Rudnici su obično danas za smeštaj rude snabdeveni bunkerima od armiranog betona. Samo se levci i deo zidova izložen habanju oblažu čeličnom zaštitom protiv habanja. Termičke centrale najčešće su građene potpuno od armiranog betona. Njihovi bunkeri za pripremu rezerve goriva od armiranog su betona i onda kada je skeletna konstrukcija od čelika. Turbinski stolovi grade se u nas redovno od armiranog betona. Za stolove za parne turbine od značaja je ne samo naprezanje konstrukcije pod uticajem mirnog opterećenja koje sto nosi, nego je od još većeg interesa kako će se sto odupreti vibracijama mašina stalne učestalosti. Iz bojazni od rezonancije turbineskog stola i same turbine sa generatorom teži se da su sopstvene frekvencije turbineskog stola veće od radne frekvencije harmonijskih oscilacija mašina. U tom slučaju nikad ne može doći do poklapanja frekvencija turbineskog stola i mašina. Posledica je ovakva zahteva izrada konstrukcije stola vrlo visokog stepena krutosti, odnosno visoke sopstvene frekvencije. Zato se u nas retko primenjuju i čelični stolovi i stolovi od prethodno napregnutog betona. Tek se u poslednje vreme prišlo gradenju tzv. niskofrekventnih stolova. Takvi se stolovi grade od dosta gipkih elemenata; broj sopstvenih frekvencija takvih stolova iznosi oko 1/4 do 1/3 od frekvencija mašina. Moderne turbine imaju i po 3600 obrtaja u minuti, osovine turbina imaju sopstvenu učestalost približno 1/3 titraja turbine. I sama osovina prolazi tokom puštanja turbine u rad kroz fazu rezonancije, dok ne postigne pun broj obrtaja. Da dode do rezonancije potrebno je duže poklapanje broja frekvencija elemenata koji mogu da uđu u rezonanciju. Kako mašine prolaze kontinualnim tokom od 0 do konačnog broja obrta, turbineski stolovi mogu — kao i osovine turbine — imati mali broj sopstvenih frekvencija. Ovo otvara mogućnost primene čelika i betona sa prethodnim naprezanjem, a sem toga i turbineski stolovi građeni od klasičnog ili prethodno napregnutog betona dobiće sasvim drugi izgled i drugu ekonomsku vrednost. Konstruktorima turbine ovo pruža veće slobode, jer su masivnom konstrukcijom mašinski gabariti u prostoru stola vrlo stešnjeni.

Pri proračunu turbineskih stolova i svih drugih konstrukcija za nošenje mašina koje izazivaju harmonijske vibracije pretpostavlja se linearna zavisnost između napona i deformacija. Otuda se može smatrati da armirani beton predstavlja materijal manje nepovoljan u pogledu izazivanja rezonancije nego čelik. Zavisnost između napona i deformacija u betonu je parabolična, deformacije rastu brže od napona. Kad sto ulazi u rezonanciju, čim se trajanjem rezonancije postigne znatno povećanje napona, usled deformacije opada sopstvena frekvencija stola i rezonancija prestaje; trebalo bi da takav sto sam reguliše svoju frekvenciju tako da se izbegava rezonancija. Ispitivanje rezonancija pri nelinearnoj zavisnosti napona i deformacija nije teorijski obrađeno za praksu; ono nije još ni eksperimentima dovoljno jasno prikazano; ta ideja je već desetak godina u nas nagovušena, kao jedna mogućnost objašnjenja zašto rezonancije do danas nisu zapažene u katastrofalmom obliku, već samo kao nemiran rad mašina.

Armirani beton u arhitekturi. Armirani beton je od prošlosti bio primenjivan u arhitekturi više nego u ma kojoj drugoj gradevinskoj struci. Razlog za to su njegove osobine i prilikom građenja i kasnije, u toku iskorišćivanja objekta. Osobina betona da se od njega mogu izradivati elementi koji imaju oblike po našoj želji predstavlja karakteristiku betona koja ga čini prevashodnim arhitektonskim materijalom. U spoljnoarhitektonskom pogledu on sve više pruža inventivnim arhitektima i materijal za element fasade a ne samo za konstrukciju zgrade. Poznata su dostignuća danas brojnih arhitekata u primeni armiranog betona, i betona uopšte, kao izražajnog arhitektonskog sredstva. Peret je počeo da sprovodi ovu ideju još početkom ovoga veka u Parizu. Nju su kasnije prihvatali mnogi najeminentniji arhitekti današnjice. Posledica toga je bila arhitektonska revolucija. Nov gradevinski materijal pružio je nove arhitektonske mogućnosti. Stari principi građenja, nasledeni iz klasične, zamjenjeni su novim mogućnostima koje je pružao armirani beton. Masivno, klasično zidanje ustupa mesto skeletnom. Monolitnost konstrukcije, koja se relativno jednostavno postiže i uz najraznovrsnije konstruktivne oblike, vodi sve novim arhitektonskim oblicima.

Postojanost betona prema koroziji i drugim uticajima zavisnim od vremena i starosti konstrukcije čini ga vrlo privlačnim za primenu u arhitekturi. Koštanje održavanja svodi se na nulu za one arhitektonске konstrukcije koje nemaju nikakvih dodatnih slojeva veštačkog kamena za arhitektonsku obradu, nego je sama masa konstrukcije obrađena kamenorezačkim postupcima. U arhitektonskim objektima mora i zbog njihove upotrebe biti otklonjeno vlaženje konstrukcija. Konstrukcije vlažene atmosferskom vlagom izložene su procesu »starenja«. Ovaj proces je to brži što više makro-pora ima u svojoj strukturi beton konstrukcije. Razaranje vrši s vremenom voda u porama pretvarajući se zimi u led.

Pojava raznih vrsta konstrukcija u obliku ljudski doprinosi još većoj rasprostranjenosti primene armiranog betona. Ove konstrukcije svakim danom dobijaju, sem čisto funkcionalnih oblika, i druge oblike koji imaju gotovo karakter plastičke umetnosti. Nijedan gradevinski materijal nije do danas arhitektima dao toliko poleta u razvijanju ideja lakin, lebdéćih objekata kao armirani beton; osobito u oblasti primene vitopernih ljudski, tipa hiperboličkih paraboloida. Analiza je ovih tipova konstrukcija, međutim, dosta složena; često se mora pribegavati rešavanju parcijalnih diferencijalnih jednačina numeričkim postupcima, ili se analiza uopšte vrši dosta složenim matematičkim aparatom. Otuda arhitekti mogu teško da ocene koji od sistema što su ih sebi plastički dočarali mogu biti i ostvareni kao ljudskasta konstrukcija. Sve se više izgraduju arhitekti specijalisti za projektovanje značajnih novih tipova konstrukcija ljudski.

Beton u hidrotehnici. Već se davno hidrotehničke konstrukcije vrlo rado grade od armiranog i običnog betona. Velik broj objekata, vrlo značajnih po njihovoj funkciji a isto tako i po njihovu koštanju, i danas se gradi od običnog betona; redom su to masivni objekti. Najčešće se stabilnost takvih konstrukcija zasniva na njihovoj težini; otuda nema svrhe smanjivati njihovu masu. U poslednje se vreme sve više ispoljavaju konstruktorske težnje da se ovaj najstariji način konstruisanja zameni novijim. Tako se danas i gravitacione brane grade kao olakšane. Isto tako se pokušava da se grade kao mnogoljni sa kontraforima; traže se rešenja koja bi uspešno zamenila gravitacione, teške brane, pa čak i gravitacione brane olakšane tipa. Na sl. 23 prikazane su brane u preseku i osnovi: a) gravitacionog teškog tipa, b) gravitacionog olakšanog tipa i c) mnogoljni sa kontraforima (tip a je masivan, tip b je razuden, a tip c je razuden do krajnje mogućnosti). Po istom redu padaju kubature brana — najviše su u slučaju a, najmanje u slučaju c. To, međutim, nije bitna karakteristika i u ekonomskom pogledu. Cene jednoga kubnog metra nisu iste u svim slučaju, one rastu istim redom. Ukupno koštanje brana svaka od tri tipa u jednom određenom slučaju trebalo bi da opada po redu od a do c, ali ne opada u istoj meri kako opadaju zapremine njihove betonske mase. Niža cena, međutim, nije glavna prednost tzv. razudenih tipova brana. Za masivni tip brane, iako je on najjednostavnije konstrukcije, sa najmanje sigurnosti može da se govori kakva se sve unutrašnja zbivanja događaju u telu brane pod delovanjem svih uticaja kojima brana treba da se suprotstavi.

Najmanje se može pouzdano znati što se dogada pod uticajem zapreminskih promena u betonu, bilo onih od skupljanja betona bilo od uticaja temperaturnih promena. Ovi „parazitni“, štetni uticaji opadaju sa opadanjem debljina elemenata konstrukcije. Tako se masivne konstrukcije sve više približavaju lakinim tipovima, a beton ustupa mesto lako armiranom betonu. Ima već i vrlo značajnih ostvarenja sa primenom početnih naprezanja u sva tri tipa brana na sl. 23.

Značajna je primena betona i armiranog betona u hidrotehnici i izrada obloga tunela za dovodenje vode pod pritiskom jezera do vodostana. Često obloge dolaze u brdsku masu koja nije dovoljna da se spolja suprotstavi unutrašnjem potisku vode u cevi. U takvim se slučajevima upotrebljava za izradu obloge bilo armirani beton bilo prethodno napregnuti beton. U nas se, zbog visoke cene čelika — legiranog da se smanji korozija —, dosta retko ovakvi delovi tunela oblažu limom; zemlje bogatije čelikom to čine i iz sigurnosnih razloga i iz razloga ekonomije.

Za izradu velikog broja najraznovrsnijih objekata u steni i na njoj, za potrebe i svih drugih tehnika građenja, ne samo hidrotehnike, beton i armirani beton su vrlo pogodan materijal. To dolazi otuda što beton prilikom ugradivanja može zbog svoje plastičnosti da prati i najsloženiju plastiku iskopa stene u kojoj se gradi. Pun dodir stene, a zbog adhezije i trenja i spoj stene sa betonom, odstranjuju koncentraciju napona na dodirnoj površini. Ovo omogućuje izradu obloge kaverna u steni, koja je često pod vrlo velikim brdskim pritiskom. Beton, a pogotovo ako je armiran, u hidrotehničkim konstrukcijama mora biti kompaktan, sa što manje makro-pora. Takve pore mogu da primaju u sebe vodu slobodnu od napona; ova se voda zimi smrzne i konstrukcija je s vremenom izložena razaranju, osobito ubrzanim zbog korozije armature. Voda u mikro-porama betonskog maltera je pod kapilarnim naponom pa zato ne mrzne.

Beton u ratnom građevinarstvu. Gotovo da je beton i armirani beton u ratnom građevinarstvu u Prvom svetskom ratu dao veći učinak nego u Drugom. Za Drugi svetski rat su se spre male sve države te su se obezbedile bunkerima za rovovski rat na granicama prema eventualnom neprijatelju. Na izgled to je bila ideja ekonomisanja u gubitku ljudi i sredstava. Protivmre taktičkoga karaktera i specijalna oružja umanjile su značaj utvrdenja raznih linija. Dobro smisljena skloništa pasivne zaštite, sa dovoljnim debljinama zidova i tavanica za pun pogodak, opravala su izdatke učinjene za njih.

Rušilačka sredstva prošlih ratova išla su za tim da sruše samo objekte koji su cilj napada. Konstruktor je, prema važnosti objekta kao neprijateljskog cilja rušenja, konstruisao njegove elemente da se odupru lomu od pogotka oruđem čija je upotreba za uništenje takvog ratnog cilja bila opravdana. Ova su očekivanja u ratu vrlo često obmanula, jer ratni ciljevi ne respektuju ideju o ekonomičnosti poduhvata.

Beton i armirani beton svojom monolitnošću čini se da pružaju velike mogućnosti za izradu tvrdavskih objekata izloženih napadu odgovarajućih vatrenih oruđa. Oglednim postupcima došlo se do zaključka da se dinamičke sile udara napadnog oruđa ne mogu pretvarati u statička opterećenja i da se, prema tome, dimenzionisanje elemenata na udar zrna može vršiti pouzdano samo eksperimentalnim postupcima. Relativno mala otpornost betona na zatezanje, nešto veća na smicanje, a najveća na pritisak, daju konstruktoru izvesne idejne smernice kako da postupa pri građenju objekta izloženog pogotku. Posle raznih istraživanja došlo se do ideje da beton armiran „kubičnom“ armaturom u sva tri koordi-

natna pravca treba da da najviše sigurnosti ovakvim objektima. Nema jasnih iskustava o podeli ukupne količine armature u pojedine od pravaca, niti je pokazan znatan porast otpornosti sa povećanjem količine armature; preporučuje se umerena količina armature srednjih prečnika šipki, zavarenih na mestu ukrštanja, jednaka u sva tri pravca. Nova ratna oruđa čine neodređenima ideje o budućim vojnim objektima utvrđivanja.

Prefabrikacija i klasičan način građenja. Klasičan način građenja sprovodi se još uvek pri znatom broju građevina. Za takav način građenja potrebno je izraditi skelu i oplatu za betonsku konstrukciju, u oplatu treba montirati čelični skelet, armaturu konstrukcije onda betonirati i, na kraju, negovati takvu sveže izbetoniranu konstrukciju. Većina ovih radova zahteva pogodne meteoroške prilike za njihovo izvršenje.

Danas se proučava u mnogo zemalja industrijska proizvodnja elemenata građevinskih objekata i njihova montažna na mestu. Sa razvojem prethodno napregnutih konstrukcija raste u znatnoj meri broj objekata sagrađenih montažnim sistemom. Montažni

no građenje ne može biti samo sebi cilj. Njega treba sprovoditi onda kad je ekonomski i tehnički opravданo. Njegova logičnost postoji ako se elementi ponavljaju u velikim serijama te se isplati organizacija njihove fabričke proizvodnje.

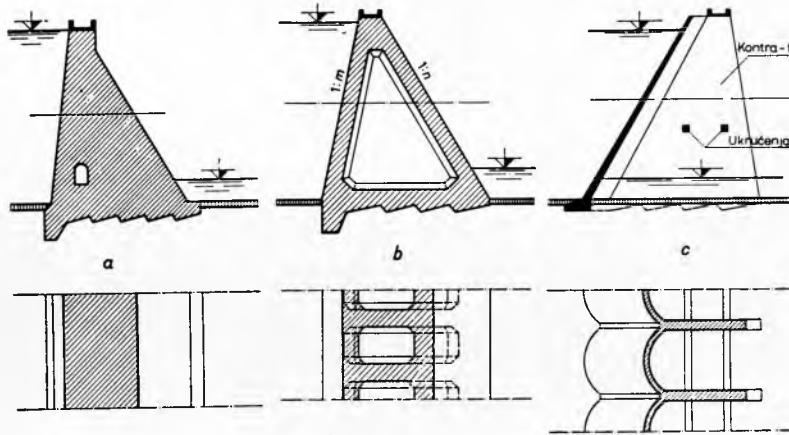
Montažno građenje ne treba da odstrani neophodno potrebnu monolitnost veza obrazovanih na gradilištu. Kako je fabrički proizveden beton bolje kvaliteta nego beton proizveden pod gradilišnim uslovima, na mestu montažne veze vrši se pojačanje preseka.

Kad se poveća broj istovetnih objekata, pristupa se, radi smanjenja spojeva na gradilištu, panelnom montažnom građenju. Izraduju se čitava polja tavanica i montiraju vezivanjem sa stubovima na građevini. Ovakav način je ekonomičan ako znatan broj po konstrukciji jednakih objekata zahteva ugradivanje toliko velikog broja jednakih panela da je njihovo fabričko proizvodenje ekonomično.

Ako se gradi velik broj jednakih stanova, pokušava se da se fabrički proizvedu i montiraju na gradilištu čitavi stambeni delovi, osobito oni sa sanitarnim uredajima. Pri tom je ovde glavni cilj da se zanatsko-instalaterski deo svede na fabričko-monterski nivo; konstrukcija poda, plafona i zidova ovakvih delova stanova su samo nosioci instalacija koje treba fabrički ugraditi.

Sem u zemljama velikoga industrijskog potencijala, montažno građenje u svetu, pa i u nas, ima karakter pokušaja za sticanje iskustava i intelektualnih i zanatskih saradnika na ovom poslu. Montažno građenje već pokazuje neke svoje prednosti i u ovakvoj fazi razvoja, ali ima još i nedostataka koji se ne mogu lako otkloniti dok se ne sproveđe prava industrijska proizvodnja elemenata, sa uskim tolerancijama proizvodnje. Samo takve tolerancije omogućuju montažno uklapanje elemenata konstrukcije jedan u drugi, brzo i racionalno.

LIT.: E. Mörsch, Eisenbetonbau, Stuttgart 1926. — M. Kasal, Željezobeton u teoriji i praktici, Ljubljana 1929. — G. Magnel, Pratique de calcul de beton armé, Gand 1931—1936. — H. Craemer, Teorija plasticiteta armiranog betona, Beograd 1949. — G. E. Large, Basic reinforced concrete design, New York 1950. — D. Lazarević, Osnovi teorije armiranog betona, Beograd 1950. — V. Kostić, Betonske konstrukcije, Beograd 1952. — B. Širola, Priručnik za armiran beton, Zagreb 1953. — A. Pucher, Lehrbuch des Stahlbetonbaues, Wien 1953. — C. W. Dunham, The theory and practice of reinforced concrete, New York 1953. — R. Saliger, Nova teorija armiranog betona na osnovu plastičnosti pred silom, Beograd 1954. — H. Lossier, Patologija armiranog betona, Beograd 1954. — K. V. Sahnovski, Armiranobetonske konstrukcije, Beograd 1954. — B. W. Boguslavsky, Design of reinforced concrete, New York 1956. — I. C. Urquhart, C. E. O'Rourke i G. Winter, Design of concrete structures, New York 1958. — Б. Уларий, Железобетонные конструкции, Киев 1958. — V. Juranović, Beton i armirani beton, Zagreb 1959—61. Đ. L.



Sl. 23