

PREDNAPETI BETONSKI SKLOPOVI

I Definicija prednapetog betona

Prednapeti je beton armirani beton u kojem je **umjetno** stvoreno, **prije nanošenja opterećenja** ili **istodobno** s njim, trajno stanje naprezanja koje, zajedno s naprezanjima od vanjskih opterećenja, daje naprezanja koja za **sva** predvidiva vanjska opterećenja ne premašuju naprezanja koja gradivo može **trajno** podnositi.

2 Uvod

2.1 Sažet povijesni osvrt

Beton je u uporabi već više od 2 000 godina, a tek se je u XIX. stoljeću pojavio **armirani** beton.

Nedostatci su armiranog betona kao gradiva poznati, a najvažniji su:

- razmjerno mala vlačna čvrstoća,
- raspucavanje pod opterećenjem, ali i pod djelovanjem ΔT , te spriječenih pomaka,
- velik udio vlastite mase u ukupnom opterećenju,
- nemogućnost premoštenja većih raspona.

To je nagnalo konstruktore, potkraj XIX. stoljeća, da pokušaju ukloniti te nedostatke ugradbom prednapete armature.

Inače je ta zamisao na tragu višestoljetne (pa i tisućljetne) primjene prednapinjanja.

2 Uvod

2.1 Sažet povijesni osvrt

Naime, čelični obruči drže na okupu duge drvene bačve i omogućuju im da izdrže hidrostatski tlak tekućine u njoj; sličnu ulogu ima i obruč na drvenom kotaču, koji uz to omogućuje trenje između oboda drvenog dijela i obruča kotača itd.

Prvi prijedlog za primjenu prednapinjanja betona pojavljuje se u SAD (*P.J. Jackson*, 1886.).

Gotovo istodobno javlja se sličan prijedlog i u Njemačkoj (*W. Döhring*, 1888.).

Glavna je svrha prednapinjanja bila spriječiti raspucavanje betona.

Austrijanac *J. Mandl* (1896.) iznosi zamisao po kojoj se prednapinjanjem armature može djelovati suprotno vlačnim naprezanjima što nastaju pod djelovanjem vanjskih opterećenja.

2 Uvod

2.1 Sažet povijesni osvrt

M Koenen počeo je u Berlinu (1906.) pokuse s gredama u koje je bila ubetonirana prednapeta armatura. Armatura je, međutim, bila preslabo napeta (60 N/mm^2), pa je **prednaprezanje** u njoj postupno sasvim **išchezlo** zbog **skupljanja** i **puzanja** betona, o čemu se u ono doba nije znalo ništa.

Do sredine 20.-ih godina prošloga stoljeća bilo je još nekoliko sličnih neuspjelih pokušaja.

W. Wettstein je 1919. a *R. Dill* 1923. (oba Nijemci) prvi put primijenio čelik visoke čvrstoće za prednapinjanje.

Nijemac *R. Färber* izumio je 1927. uređaj što omogućuje klizanje čelika za prednapinjanje za vrijeme napinjanja.

F. v. Emperger (Austrija) primijenio je 1939. **istodobno** nenapetu i napetu armaturu, što je početak **djelomičnoga** prednapinjanja.

2 Uvod

2.1 Sažet povijesni osvrt

Između 1930. i '50. dolazi do prvih **primjena** PB u građenju, poglavito **mostova**.

Francuski inženjer **E. Freyssinet** proučavao je od 1911. g. pojavu **puzanja** betona mjerenjem razmjernih skraćanja na velikim betonskim lukovima, pa je utvrdio bit puzanja i bitne pretpostavke za uspješnu primjenu prednapinjanja.

Takvim je postupkom u prvom redu točno utvrdio djelovanje unutarnjih sila kojima se može prilagoditi oblik, izmjere i armatura PB sklopa.

Međutim, još je važnije to što je razvio **postupak** s pomoću kojeg se može **utjecati** na djelovanje tih sila i na izobličenja sklopa.

Freyssinet je 1928. ostvario prvi prednapeti betonski sklop s naprežanjem u čeliku 400 N/mm². To je značilo preokret u tehnici građenja betonom.

2 Uvod

2.1 Sažet povijesni osvrt

Od 1930. g. Freyssinet primjenjuje prednapinjanje sve smjelije u nizu sklopova i građevina, pa je 1941. projektirao izvanredno vitki dvozglobni okvirni most preko Marne kod *Luzancyja* s rasponom 55 m.

Most je, međutim, izgrađen tek nakon II. svjetskog rata, kada je izgrađeno još pet sličnih mostova preko Marne. Pri građenju tih mostova primijenjeno je nekoliko postupaka što će tek poslije ući u širu graditeljsku praksu:

- prednapinjanje hrpta (kasnije napušteno),
- nadoknada (kompenzacija) pomaka od skupljanja i puzanja betona,
- sklapanje predgotovljenih odsječaka (montaža prefabriciranih segmenata).

Valja znati da je Freyssinet prvotno razvio **betonsku** sidrenu glavu.

2 Uvod

2.1 Sažet povijesni osvrt

Tridesetih godina XX. st. **F. Dischinger** predlaže postavljanje natega **izlomljene** (poligonalne) **osi** izvan presjeka nosača, ali **unutar** visine sklopa, što bi omogućilo naknadno **dodavanje sila**.

Približno istodobno **U. Finsterwalder** razmatra utjecaj **podvlačenja** natega pod gredu sa središnjim **zglobom** oko kojeg se zaokreću dijelovi grede uz istodobno **razmicanje** krajeva pod djelovanjem vlastite mase grede.

Njih su dvojica prijavili patente za **vanjsko** prednapinjanje (bez prijanjanja) primjenjivo na cestovne mostove.

Nijemci **K. Lenk** i **H. Lütze** grade 1938. nakon pokušâ u velikom mjerilu, izvedenih 1935. i '37. nadvožnjak nad autocestom, a zatim, 1941. i autocestovni most.

2 Uvod

2.1 Sažet povijesni osvrt

E. Hoyer razvio je (1938.) postupak prednapinjanja čeličnim **strunama** vrlo velike čvrstoće ($1,6+2,8 \text{ kN/mm}^2$) što predaju silu betonu **prianjanjem**.

Z. Franjetić otkupio je ovlasnicu ("licencu") od Hoyera (1941.) i izradio pogon za proizvodnju predgotovljenih PB gredica u Remetincu kod Zagreba. Taj je pogon pripao nakon nasilnog razvlaštenja poduzeću **Jugobeton**, što je proizvodilo te gredice sve do 1976.

Istinski procvat PB sklopova, na međunarodnoj razini, ostvaren je, međutim, tek u godinama nakon II. svjetskog rata. Naime, strahovita ratna razaranja nametnula su mnogo širu primjenu betona u obnovi porušenih mostova, pa i onih većih raspona.

Švicarski inženjeri **M. Birkenmayer**, **C. Brandestini**, **M. Roš** i **K. Vogt** utemeljuju 1948. sustav prednapinjanja **BBRV** (nazvan po početnim slovima njihovih prezimena). Kasnije je osnovana i istoimena tvrtka (bez slova V), što djeluje i danas.

2 Uvod

2.1 Sažet povijesni osvrt

Natege ovoga sustava sastojale su se od žica $\varnothing$ 7 mm sidrenih s pomoću hladno oblikovanih glavica.

Prvi cestovni most prednapet ovim sustavom izgrađen je 1950.

Po projektu Austrijanca **P.W.Abelesa** (koji je za vrijeme rata prebjegao u V. Britaniju) izgrađeni su 1948. prvi **djelomično** prednapeti betonski mostovi.

1949. utemeljen je sustav **Dywidag** s nategama od orebrenih šipaka velika promjera.

Iste godine **F. Leonhardt** (prvo s **W. Baur**om) izvodi moćne okrupnjene natege sastavljene od užetâ, a zatim (sâm) projektira cestovni most s PB sklopom preko više polja.

Godinu kasnije projektira PB željeznički most preko više polja.

U. Finsterwalder gradi 1950. prvi PB most postunim prepuštanjem ("konzolni" postupak).

2 Uvod

2.1 Sažet povijesni osvrt

Osobito je zaslužan za razvitak i primjenu PB-a Belgijanac **G. Magnel**, koji je razvio vlastiti postupak prednapinjanja i projektirao prvi most s protežnim (kontinuiranim) rasponskim sklopom (preko *Maasa* kod Sclayna, rasponi: 2 × 62 m) i napisao prvu knjigu o PB-u.

Godine 1953. osnovano je *Međunarodno društvo za prednapeti beton* (*Fédération Internationale de la Précontrainte*, **FIP**).

To se je društvo 1998. ujedinilo s *Euro-međunarodnim odborom za beton* (*Comité Euro-International du Béton*, **CEB**) i sada djeluje pod imenom *Međunarodnoga društva za beton* (*Fédération Internationale du Béton*, **fib**).

Hrvatski ogranak primljen je u **FIP** 1992. (nakon osamostaljenja Hrvatske), a od 1998. pripada **fib**-u. Priredio je izvanredno uspjeti **fib**-ov simpozij u Cavtatu 2007.

2 Uvod

2.1 Sažet povijesni osvrt

Na razvoj tehnike prednapinjanja u nas utjecala je ponajprije djelatnost poduzeća Jugobeton, koje je projektiralo i izvodilo tvorničke hale i mostove, a imalo je i uspješnih ostvarenja (npr. krovne rešetke $l = 36,0$ m).

S druge strane **B. Žeželj** (rodnom iz benkovačkoga kraja) razvija 1952. vlastiti postupak prednapinjanja (po uzoru na Freyssinetov) nazvan sustavom IMS (*Institut za materijale SR Srbije*).

Primjenom ovoga postupka ostvarena su brojna vrijedna postignuća, osobito u mostogradnji (Šibenski, Paški i Krčki most), ali je i otežavana primjena boljih, inozemnih sustava.

To je djelomice ublaženo tek 1967. kada je zagrebačka *Geotehnika* otkupila ovlasnicu BBR-a. Međutim, ona je ovaj sustav znatno više primjenjivala pri sidrenju zaštitnih stijena građevnih jama (gdje nije imala premca) nego u mostogradnji.

2 Uvod

2.1 Sažet povijesni osvrt

Napredak PB sklopova može se najbolje slijediti promatranjem porasta raspona **grednih** mostova. Tako se je, nakon već spomenutoga prvog mosta od PB raspona 55 m, uznapredovalo toliko da je 1998. izgrađen most raspona 301 m (Skalsundet u Norveškoj).

Građenje visokih TV tornjeva omogućila je uporaba PB-a, jer se samo takvim sklopovima mogu svladati vrlo veliki momenti savijanja što nastaju pod djelovanjem vjetra i što bi se mogli pojaviti pri potresu. Tako su izgrađeni vrlo visoki tornjevi u Torontu ($h = 553$ m) i Moskvi (525 m). Takav je i TV toranj na Medvednici kod Zagreba (170 m).

Dalji razvitak PB sklopova ide u smjeru poboljšanja zaštite čelika od korozije.

Tzv. djelomično prednapinjanje sve se više primjenjuje zbog ovih prednosti: manji protuprogib, manji utrošak betona i skupoga čelika za prednapinjanje.

2 Uvod

2.2 Svrha prednapinjanja

Kako je već spomenuto, prednapinjanje je primjenjivano već od pradavnine.

Najbolje to pokazuju primjeri nabijanja čeličnih **obruča** na drvene bačve i na drvene kotače zaprežnih kola.

Djelovanjem hidrostatskoga tlaka tekućine u bačvi nastaju sile što djeluju na oplošje bačve i što nastoje razmaknuti **düge**.

Nabijanjem obruča stješnjuju se reške među dügama, pa se one ponašaju poput **klinova**.

Sili što djeluje na unutarnju plohu düge suprotstavljaju se sile na njezinim bokovima.

Te sile na bokovima djeluju po cijelom oplošju bačve, dakle kao i sile od hidrostatskoga tlaka, ali u suprotnomu smjeru.

Prema tome nabijeni obruč ima suprotan učinak od djelovanja hidrostatskoga tlaka.

2 Uvod

2.2 Svrha prednapinjanja

Čelični obruč na drvenom **kotaču** sprječava njegovo trošenje.

Ako bi bio izrađen točno po mjeri kotača, klizio bi po njegovu obodu, jer bi trenje između obruča i kotača bilo nedostatno za pridržavanje obruča.

Zbog toga se obruč izrađuje tako da ima nešto manji unutarnji promjer od vanjskoga promjera drvenog dijela kotača, pa se užareni obruč natiče na kotač.

Ohlađeni obruč steže drveni kotač, pa tako nastale zrakaste (radijalne) sile osiguravaju dostatno trenje između obruča i kotača, što sprečava sklizanje (a i spadanje) obruča.

Podjednako je važno to što ovaj obruč stezanjem unosi obodnu silu u drveni prsten kotača i tako poboljšava stanje naprezanja u njemu pri njegovu gibanju pod opterećenjem.

2 Uvod

2.2 Svrha prednapinjanja

Prednapinjanjem tankih čeličnih **žbica** na kotaču **bicikla** sprječava se njihovo **izvijanje** pod opterećenjem.

Tako **vlačna** sila u žbici unesena **prednapinjanjem** poništava **tlačnu** silu što se pojavljuje pod djelovanjem **tereta**, pa zbog toga ne postoji opasnost od izvijanja.

Svrha je prednapinjanja, dakle, proizvesti **djelovanje** koje se **trajno** suprotstavlja nepovoljnim djelovanjima i pojavama u tijeku vijeka trajanja sklopa ili naprave.

U slučaju **armiranog betona** svrha je prednapinjanja prevladati ili barem ublažiti **nedostatke** AB kao gradiva.

Prisjetimo se, beton ima razmjerno veliku tlačnu i $\sim 10 \times$ < vlačnu **čvrstoću**, a ima i razmjerno veliku prostornu **težinu**. Zato je izrazito **neprikladan** za sklopove u kojih prevladava **savijanje**.

2 Uvod

2.2 Svrha prednapinjanja

Zbog potrebe da se gradi **jeftino** i **brzo**, ali i iz **uporabnih** razloga **oblici** sklopova moraju biti **jednostavni**. Tako dolazimo do sklopova u kojih prevladava **savijanje**.

Ako ih gradimo od AB, oni **raspucavaju** pod uporabnim opterećenjem, a raspucali dio sklopa zapravo je **mrtvi teret**.

To osobito dolazi do izražaja u sklopova većega **raspona** gdje taj mrtvi teret može činiti i do **50 %** ukupne **mase**.

Odmah se nameće pomisao da **prednapinjanjem** AB sklopa treba postići to da **sav** presjek (ili njegov najveći dio) sudjeluje u radu sklopa.

Bit je ove zamisli da se u dijelu presjeka u kojem će se u uporabi pojaviti velika **vlačna** naprezanja proizvedu **tlačna**, a time će se ujedno smanjiti tlačna naprezanja uza suprotni rub presjeka.

2 Uvod

2.2 Svrha prednapinjanja

Tako se istodobno **spriječava** (potpuno ili djelomice) **raspucavanje** betona u vlačnom pojasu nosača. Zahvaljujući tomu bitno se povisuje **krutost** presjeka.

Zanimljivo je da je **krutost PB nosača veća** i od krutosti **čeličnog** nosača **iste visine** (slika 2.1).

Naime, poznato je da je $E_s > E_c$
 $\sim (5 \div 6)$ puta, ali je $I_c > I_s$
 ~ 8 puta, pa je dakle PB nosač
 ukupno osjetno **krući**.

Naravno, PB nosač višestruko je krući od AB nosača iste visine. *Slika 2.1: PB i čelični nosač jednake visine*

Ovo se poboljšanje ostvaruje unošenjem **tlačne sile** u AB nosač, što se naziva **napinjanjem**. Budući da se to zbiva **prije** nego što je nosač u **uporabi**, uvriježen je izraz **prednapinjanje**.



2 Uvod

2.2 Svrha prednapinjanja

PB ima još jednu važnu prednost: bolje podnosi **titranja** (vibracije).

Osim toga, zbog manje raspucalosti manje je osjetljiv na **umor**. Što je s cijenom?

Čelik za **prednapinjanje skuplji** je $(4 \div 5)$ puta od čelika za **armiranje**, a nuždan je i beton **visoke čvrstoće** (najmanje C25/30).

Odmah valja reći: PB je **po jedinici obujma skuplji** i zato **nije** prikladan za sklopove **malih** raspona. Međutim, kako raste **raspon**, raste i njegova prikladnost.

Općenito se prednapinjanjem mogu ostvariti **gospodarniji** (ekonomičniji) i **djelotvorniji** građevni sklopovi.

Tako se prednapinjanjem vlačnog pojasa **rešetke** izbjegavaju **vlačna** naprezanja u betonu, a **predgotovljeni** dijelovi spajaju se u **cjelinu**.

2 Uvod

2.2 Svrha prednapinjanja

Prednapinjanjem se može **nadomjestiti** djelovanje **velikih** vlastitih **masa**, pa se masivne betonske **brane** mogu nadomjestiti AB branama znatno manjega presjeka, ali se moraju nategama (kabelima) **usidriti** u tlo.

Definiciju **natege** dat ćemo kasnije.

Općenito se prednapinjanjem **smanjuje** utrošak betona (a i čelika) što omogućuje znatno **vitkije** sklopove.

2 Uvod

2.3 Zašto je nuždan čelik visoke čvrstoće

Spomenuli smo da su prvi pokušaji prednapinjanja **propali** zbog toga što tadašnji inženjeri **nisu znali** za **skupljanje** i **puzanje** betona.

Radi se o tomu da se zbog **prianjanja** betona i čelika prigrdom **skraćivanja** betona djelovanjem skupljanja i puzanja skraćuje i **čelik**, zbog čega **splašnjava** početno **naprezanje** u njemu.

Pogledajmo izblizega o kojim se veličinama radi.

Znamo da se betonska prizma duljine 1,0 m djelovanjem skupljanja skrati nakon 3÷5 godina (kada taj proces zapravo završava) za 0,2÷0,4 mm.

Dakle prosječno je skupljanje

$$\varepsilon_s = 0,3 \text{ mm/m } [\text{‰}]$$

2 Uvod

2.3 Zašto je nuždan čelik visoke čvrstoće

S druge strane, puzanje je priraštaj skraćanja betona pri stalnom naprezanju, a izražava se kao umnožak elastičnoga skraćanja i koeficijenta puzanja:

$$\varepsilon_k = \varepsilon_{el} \cdot \varphi$$

Elastično se skraćanje, po *Hookeovu* zakonu, dobije dijeljenjem naprezanja s modulom elastičnosti:

$$\varepsilon_{el} = \sigma / E$$

Uzmimo da je prosječno tlačno naprezanje što djeluje trajno 10 N/mm².

Modul elastičnosti betona kreće se između 30 000 i 40 000 N/mm². Uzmimo da je 33 000 N/mm². Tada je:

$$\varepsilon_{el} = 10/33 = 0,3 \text{ mm/m } [‰]$$

Koeficijent puzanja, φ , obično je između 2 i 4; uzmimo srednju vrijednost, pa je:

$$\varepsilon_k = 0,3 \cdot 3 = 0,9 \text{ mm/m } [‰]$$

2 Uvod

2.3 Zašto je nuždan čelik visoke čvrstoće

To još nije sve – beton se skraćuje i pri zahladnjenju, što se izražava kao umnožak koeficijenta toplinskog istezanja, α , i promjene temperature okoliša, ΔT :

$$\varepsilon_{\Delta T} = \alpha \cdot \Delta T$$

Koeficijent α je za beton 10^{-5} po 1 K, a za ΔT uzmimo da je 20 K. Tako dobijemo:

$$\varepsilon_{\Delta T} = 10^{-5} \cdot 20 = 0,2 \text{ mm/m } [‰]$$

Zbrojimo pojedinačne udjele:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{tot}} &= \varepsilon_s + \varepsilon_k + \varepsilon_{\Delta T} = \\ &= 0,3 + 0,9 + 0,2 = \underline{1,4 \text{ mm/m } [‰]} \end{aligned}$$

Ne zaboravimo da smo uvrštavali **prosječne** vrijednosti, te da **ekstremna** vrijednost može biti veća od ove i više nego za trećinu.

2 Uvod

2.3 Zašto je nuždan čelik visoke čvrstoće

Pogledajmo sada što to znači u pogledu splašnjavanja naprezanja u čeliku, $\Delta\sigma_s$. U tu će nam svrhu biti dostatan i pojednost. tzv. radni dijagram čelika (slika 2.2).

Po Hookeovu je zakonu:

$$\Delta\sigma_s = E_s \cdot \varepsilon_{\text{tot.}}$$

Uzmimo, pojednostavnjeno, da je

$$E_s = 200\,000 \text{ N/mm}^2,$$

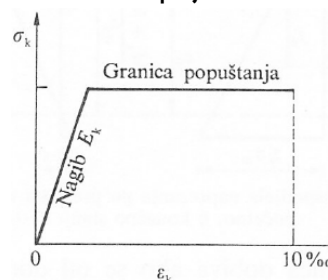
pa je:

$$\Delta\sigma_s = 200 \cdot 1,4 = \underline{280 \text{ N/mm}^2}.$$

Slika 2.2: Pojednostavnjeni dijagram čelika

Ovo je gotovo jednako vlačnoj **čvrstoći glatkoga** čelika (360 N/mm²), a iznosi 70 % **granice razvlačenja rebrastoga** čelika (400 N/mm²).

To je upravo razina **dopustivog** naprezanja toga čelika.



2 Uvod

2.3 Zašto je nuždan čelik visoke čvrstoće

Dakle ako bi početno naprezanje u čeliku bilo 280 N/mm² učinak bi prednapinjanja potpuno **iščeznuo** pod utjecajem dugotrajnih djelovanja i zahladnjenja okoliša.

Valja znati da moramo osigurati **tlak** u betonu kako bismo se suprotstavili **vlačnim** naprezanjima od vlastite težine nosača i vanjskih opterećenja, za što je također potrebna zaliha naprezanja u čeliku.

Bez ulaženja u složenije proračune, možemo uzeti da je najniža nužna granica razvlačenja čelika za prednapinjanje, f_{py} , jednaka približno dvostrukom iznosu gubitka naprezanja u čeliku, $\Delta\sigma_s$, ali ne prosječnomu, nego ekstremnom:

$$\min f_{py} \approx 2 \cdot 1,35 \cdot 280 \approx 760 \text{ N/mm}^2.$$

Doista, u sustava *Dywidag* ta je granica 830 N/mm², najniža od svih.

2 Uvod

2.4 Ostvarivanje prednapinjanja

Ostvarivanje prednapinjanja zavisi od vrsti sklopa, pa se može svrstati u dvije skupine:

- prednapinjanje greda i ploča i
- prednapinjanje rotacijski simetričnih sklopova:
 - tlačne cijevi,
 - spremnici za tekuća goriva i
 - silosi.

Prednapinjanje greda i ploča ostvaruje se:

- predhodnim i
- naknadnim napinjanjem.

Predhodnim se napinjanjem zove napinjanje čeličnih struna, spletova struna ili užetâ **prije betoniranja**. Oni se sidre u nepomične AB blokove na krajevima dugih staza ($\ell \leq 120$ m) ili u krajeve kraćih krutih oplata ($\ell \leq 30$ m, donedavna).

2 Uvod

2.4 Ostvarivanje prednapinjanja

Na dugim stazama izrađuje se istodobno tri ili više greda ili ploča, a na kraćima samo jedna.

Pošto beton **očvrsne** sidra se otpuštaju pa se napete strune (užeta) nastoje **skratiti** na duljinu što su je imali prije napinjanja. Međutim, **prianjanje** između čelika i očvrslog betona sprječava njihovo skraćivanje, pa se tako u beton unosi **tlačna sila**.

Na grede i ploče djeluju **promjenjivi** momenti savijanja. Zbog toga bi u **štedljivo** projektiranoj gredi ili ploči morao biti promjenjiv i moment savijanja izazvan silom **prednapinjanja**.

To se može postići ili sprječavanjem **doticaja** pojedinih struna (užetâ) i okolnog betona ili izvedbom **izlomljene osi** struna. Ovo drugo može se ostvariti poprečnim sidrenjem struna ili djelomičnim otklanjanjem struna.

2 Uvod

2.4 Ostvarivanje prednapinjanja

Napinjanje **nakon očvrnuća betona** izvodi se s pomoću **natega** čija se **sidra** odupiru o očvrslu beton i tako predaju u nj **tlačnu silu**.

Kako bi se omoćučilo produljenje natege pri napinjanju, natege se naknadno uvlače u zaštitne cijevi od rebrasta lima.

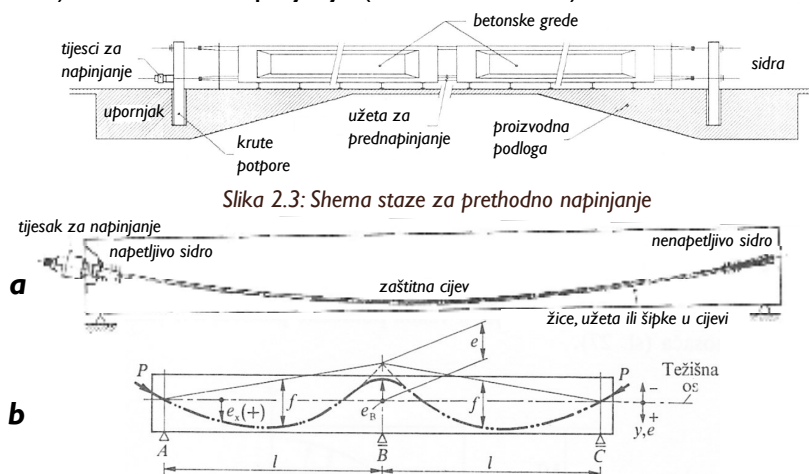
U slobodni se prostor **uštrcava**, nakon napinjanja, **cementna kaša** (smjesa za injektiranje) kako bi se čelik zaštitio od **hrđanja** (korozije), ali i kako bi se, što je podjednako važno, ostvarila **veza između čelika i betona**, bitna za zajamčenje granične nosivosti.

Prednost je **naknadnog** napinjanja u tomu što se natega može oblikovati tako da **slijedi krivulju mjerodavnih momenata savijanja**, a gdje se može i naknadno povećati sila prednapinjanja.

2 Uvod

2.4 Ostvarivanje prednapinjanja

Na sljedećim su slikama shematski predloženi predhodno (slika 2.3) i naknadno napinjanje (slike 2.4a i 2.4b).



Slika 2.4: Shema naknadnoga napinjanja; a) jednostavna greda; b) greda preko dvaju polja

2 Uvod

2.4 Ostvarivanje prednapinjanja

Naknadno se, osim toga, mogu napinjati i prostorni nosivi sklopovi: roštilji i ljuske.

Tlačne cijevi od PB proizvode se i do $\varnothing$ 5 m. Mogu se prednapinjati:

- hidraulički,
- termički,
- kemijski i
- mehanički.

U hidrauličkom postupku voda pod tlakom napinje čelične strune, raspoređene i prstenasto i duž izvodnica uz istodobno vibriranje betona. Pošto beton očvrsne, voda se ispušta iz cijevi, a strune tlače beton nastojeći poprimiti duljinu koju su imale prije napinjanja.

2 Uvod

2.4 Ostvarivanje prednapinjanja

Termičko se napinjanje izvodi namatanjem užarenih struna po oplošju cijevi. Strune se hlađenjem napinju i tlače beton. Ovaj se postupak rijetko primjenjuje.

Kemijsko napinjanje ili tzv. samonapinjanje nastaje zbog bujanja betona pri hidrataciji cementa u kojem je dodatak od ~ 15 % sadre. Beton se nanosi u mlazu (torkretiranjem) na unutarnju oplatu oko koje stoji armaturna mreža. Nakon toga cijev se umače u vrelu vodu kako bi se odvojila od oplata. Prosječno je tlačno naprezanje u betonu što se postiže ovako ~ 4 N/mm², a uz osobite postupke može se postići i 15 N/mm². Postupak je bio vrlo rasprostranjen u bivšem SSSR.

Mehaničko se napinjanje izvodi namatanjem napete strune s pomoću osobitog uređaja na slabo armiranu betonsku cijev. Nakon namatanja nanosi se sloj mlaznog betona za zaštitu struna od hrđanja.

2 Uvod

2.4 Ostvarivanje prednapinjanja

Spremnici za tekuća goriva i silosi prednapinju se jednim od ovih postupaka:

- neprekidnim napinjanjem struna po oplošju,
- napinjanjem natega (ili žica s vijcima) po odsječcima,
- povećanjem opsega stijenke spremnika i
- prisilnim skretanjem pravo položene žice.

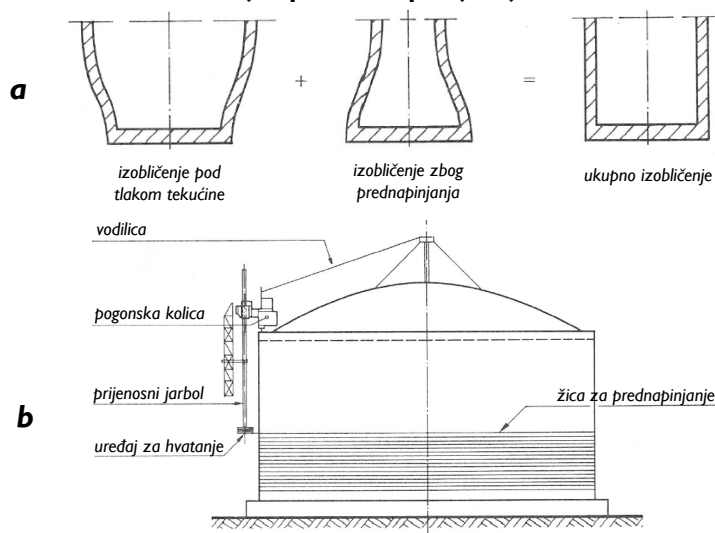
Neprekidno napinjanje struna po oplošju danas se najčešće primjenjuje. Postoji nekoliko patentiranih postupaka.

Po američkom postupku *Preload* kolica što napinju žicu opisuju zavojitu putanju po oplošju spremnika. Na ovaj su način izgrađeni spremnici $\varnothing 100\text{ m}$ i $V = 6\,000\text{ m}^3$.

Po švicarskom postupku *BBR* kolica se gibaju po vrhu stijenke, a žicu napinje kruti jarbol što seže do nje (slika 2.5).

2 Uvod

2.4 Ostvarivanje prednapinjanja



Slika 2.5: Prednapinjanje spremnika
a) stvaranje povoljnoga početnog stanja; b) načelo namatanja

2 Uvod

2.4 Ostvarivanje prednapinjanja

Napinjanje po odsječcima ostvaruje se ili s pomoću natega čija se sidra ugrađuju u 4, 6 ili 8 izbočenih rebara (lizeni) jednoliko razmještenih po obodu spremnika.

Natege se uvlače u cijevi ugrađene u stijenku, a šipke se postavljaju izvana, na stijenku, i naknadno zaštićuju mlaznim betonom.

Broj rebara zavisi od promjera spremnika. Sidra se ugrađuju u svako drugo rebro, a sidra se susjedne natege pomiču po opsegu za razmak rebara kako bi se dobila što jednoličnija raspodjela sila po opsegu spremnika. Isto vrijedi za šipke.

Promjena opsega stijenke spremnika postiže se punjenjem spremnika tekućinom i s pomoću tanjurastih tijesaka (preša). U postupku punjenja spremnika tekućinom (Reimberov postupak) stijenka spremnika ima na unutarnjoj strani niz okomitih svodova što predaju razupornu silu na obodnu stijenku i tako napinju čelične žice u njoj.

2 Uvod

2.4 Ostvarivanje prednapinjanja

Tanjurasti tijesci postavljaju se u razreze u stijenci u smjeru izvodnica što su raspoređeni na jednakim razmacima po obodu spremnika. Pošto se postigne željena sila u razreze se ugrađuje beton, a kada on očvrsne, tijesci se otpuštaju i vade.

Žica položena po pravcu usporednu s okomitom osi spremnika prisilno se otklanja od toga pravca u pojedinim točkama s pomoću protusmjernih vijaka što tako razmiču dvije susjedne žice, pa se dobiju splošteni šesterokuti omeđeni žicama.

Valja spomenuti i postupak bujanja betona pri vezanju cementa – tako je izgrađen golemi krov tržnice u Minsku (1977.).

* * * * *

U 90 % slučajeva u praksi bavimo se **prednapinjanjem greda i ploča**, pa ćemo se u ovim izlaganjima ograničiti na to.

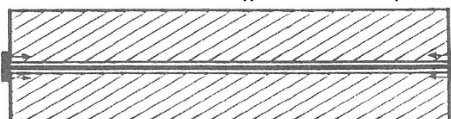
2 Uvod

2.5 Osnovna načela i pojmovi

Ovo je bit prednapinjanja: **prije** nego što djeluje **vanjsko opterećenje** na AB članak (gredu i sl.) napnemo **žicu** (ili, općenito, nategu – vidi definiciju niže) **razvlačenjem** i **nepomično** ju povežemo s AB člankom.

Žica teži poprimiti **prvotnu duljinu**, a budući da je spriječena, **tlači** beton.

Pokažimo to na najjednostavnijem primjeru (slika 2.6). Zamislimo da je u osi AB članka uvučena cijev kroz koju smo provukli žicu. Žicu razvučemo i usidrimo na čelu AB članka s pomoću



Slika 2.6: Prednapeta zatega

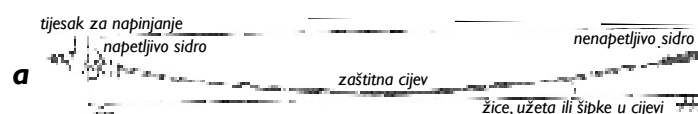
čeličnih limova. Ona nastoji poprimiti prvotnu duljinu čime predaje tlačnu silu u AB članak. Naprezanje je jednoliko po cijelom presjeku.

Međutim, cijev može biti bilo kakva oblika osi i mimoosna.

2 Uvod

2.5 Osnovna načela i pojmovi

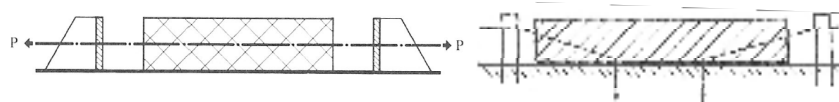
Ponovimo sliku 2.4a.



Slika 2.4: Shema naknadnoga napinjanja; a) jednostavna gređa

Ovo je, međutim moguće samo u postupku **naknadnoga** napinjanja (engl. *posttensioning*).

U slučaju **predhodnoga** napinjanja (*pretensioning*) os žice mora biti prava ili po dijelovima prava (slika 2.7).



Slika 2.7: Oblik osi natege

Žica je usidrena **izvan** AB članka, a betonira se **nakon** napinjanja. Pošto beton očvrsne žica se reže pilom ili plamenikom.

2 Uvod

2.5 Osnovna načela i pojmovi

Definicija natege (kabela)

Natega iliti kabel (engl. *tendon, cable*; njem. *Spannglied*) je cjelina sastavljena od **vlačnoga članka** i **uređaja za sidrenje**, što služi za **trajno** unošenje **sile prednapinjanja** u AB nosač, ploču, ljusku ili zategu.

Vlačni se članak (*tension element; Zugglied*) sastoji od jedne žice ili šipke ili od više žica ili struna što mogu biti usporedne (u svežnjevima) ili upletene u spletove ili užeta.

Uređaj za sidrenje iliti sidro (*anchorage; Anker*) služi za unošenje sile prednapinjanja s uređaja za napinjanje (hidraulički tijesak iliti preša) *stressing jack; Spannpresse*) na beton.

Sidro može biti napetljivo (pomično; *stressing anchorage; Spannanker*) ili nenapetljivo (nepomično; *fixed anchorage; Festanker*).

U **predhodno** napetih sklopova **prianjanje** nadomješta **sidro**.

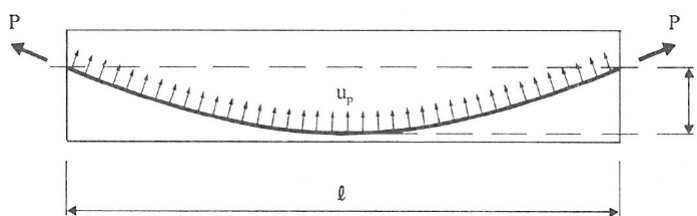
2 Uvod

2.5 Osnovna načela i pojmovi

Važno je naglasiti da sidreni uređaj **mora** moći uspostaviti **pouzdanu**, ali **razrješivu** vezu s nategom.

Bitna je razlika između predhodno i naknadno napetih sklopova u načinu **unošenja sile** u beton.

Dok se u prvih sila unosi uglavnom **prianjanjem**, u drugih se unosi na mjestu **sidrenja** i preko tzv. **skretnih** (devijacijskih) **sila** zbog nastojanja vlačnoga članka da se ispravi (slika 2.8).



Slika 2.8: Skretne sile pri napinjanju parabolaste natege

2 Uvod

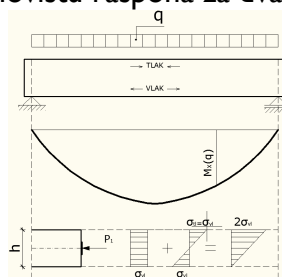
2.6 Zašto je dobro da natega bude mimoosna

Ako je AB članak napregnut **osnom** vlačnom silom (zatega), prirodno je da natega što treba poništiti vlak bude smještena u **os** članka.

Međutim, ako prevladava **savijanje**, to više nije očito. Usporedimo tijek naprezanja u presjeku u polovištu raspona za dva položaja natega:

- u težištu (simetričnoga) presjeka i
- na donjem rubu jezgre presjeka.

Uzmimo da je sila prednapinjanja tolika da poništava vlačno naprezanje izazvano savijanjem (slika 2.9).



Slika 2.9: Natega u osi grede

Budući da je presjek simetričan, tlačno je naprezanje na gornjem rubu jednako vlačnomu na donjem rubu.

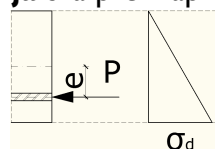
2 Uvod

2.6 Zašto je dobro da natega bude mimoosna

Zbrojimo li naprezanja od savijanja s onima od sile prednapinjanja, dobit ćemo da se ona na donjem rubu međusobno **poništavaju**, a na gornjemu **podvostručuju**.

Ako pak sila djeluje na **rubu** jezgre, naprezanje na daljem rubu iščezava, a na bližemu je dvostruko veće od težišnoga (slika 2.10). Kako naprezanje na donjem rubu treba poništiti vlak od **savijanja**, izlazi da je dostatna **upola manja** sila prednapinjanja.

Prisjetimo se kako se računaju naprezanja u presjeku, ako je sila što djeluje na nj mimoosna (slika 2.10).



Slika 2.10: Mimoosna natega

To se djelovanje račlanjuje u djelovanje osne sile i momenta savijanja, pa je rubno naprezanje:

$$\sigma_{g,d} = -(P/A) \pm (M/W_{g,d})$$

Budući da je $M = P \cdot e$, pa ako drugi član pomnožimo i podijelimo s A , dobijemo:

$$\sigma_{g,d} = -(P/A) \cdot (1 \pm e/j_{g,d})$$

Kamo je nestao $W_{g,d}$ i otkud se je pojavio $j_{g,d}$?

2 Uvod

2.6 Zašto je dobro da natega bude mimoosna

Rekli smo da rubno naprezanje iščezava ako sila djeluje na suprotnom rubu jezgre. Ispišimo to za gornji rub:

$$\sigma_g = -(P/A) + (P \cdot e)/W_g$$

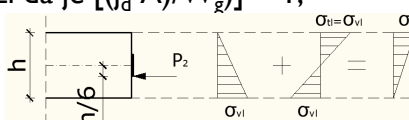
$$\text{Ako je } e = j_d, \sigma_g = 0: -(P/A) + (P \cdot j_d \cdot A)/(W_g \cdot A) = 0.$$

$$\text{Izvučimo } -(P/A) \text{ pred zagradu: } -(P/A) \{1 - [(j_d \cdot A)/W_g]\} = 0.$$

$$\text{Kako } (P/A) \text{ sigurno nije } = 0, \text{ izlazi da je } [(j_d \cdot A)/W_g] = 1,$$

$$\text{ili: } j_d = W_g/A \text{ i, naravno: } j_g = W_d/A.$$

Ako opet zbrojimo naprezanja, dobit ćemo da su na gornjem rubu ostala ona naprezanja od savijanja – **upola manja** nego u predhodnom slučaju (slika 2.11).



Slika 2.11: Natega na rubu jezgre

Ovo pokazuje da smještanje natega na rub jezgre (**mimoosno** ili **ekscentrično**) donosi **dvostruku** korist:

- **prepolovljuje** se potrebna **sila prednapinjanja** i
- **prepolovljuje** se mjerodavno **tlačno naprezanje**.

2 Uvod

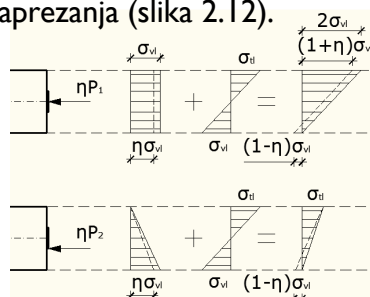
2.6 Zašto je dobro da natega bude mimoosna

Gornju tvrdnju možemo ovako preinačiti:

Uzmemo li da je dvostruko veće tlačno naprezanje iz prvoga slučaja **dopustivo** za gradivo, izlazi da nosač može, uz istu silu prednapinjanja kao u prvomu slučaju, podnijeti dvostruko veće **opterećenje**.

Gornja su razmatranja vrlo **pojednostavnjena**: ne vodi se računa o **gubitcima** sile prednapinjanja (prostornim i vremenskim), ali ni o tomu da gradivo (beton) može podnijeti i ograničena **vlačna** naprezanja (slika 2.12).

O svemu će tomu pitanje biti riječi u sljedećim izlaganjima.



Slika 2.12: Utjecaj gubitaka naprezanja pri dvama položajima natega

2 Uvod

2.7 Načela oblikovanja osi natege

U sljedećem ćemo izlaganju pokazati kako **os natege** može utjecati na **tijek rubnih naprezanja** duž nosača.

Pri tomu se moramo voditi dvama nastojanjima:

- Rubna naprezanja ne smiju ni u jednomu presjeku prekoračiti **dopustiva**.
- Raspodjelba tih naprezanja duž nosača treba biti što **povoljnija**.

Ovo drugo znači da potezi duž kojih su rubna naprezanja velika trebaju biti što kraći. To se najlakše postiže izborom oblika osi natege sličnim tijeku momenata savijanja od vanjskog opterećenja.

Izlaganje ćemo izvesti promatranjem dvaju bitno različitih vanjskih opterećenja: pojedinačnom silom i jednoliko rasprostrtim teretima.

2 Uvod

2.7 Načela oblikovanja osi natege

Odmah možemo vidjeti da prava natega smještena u težišnoj osi sama po sebi izaziva **jednolika** tlačna naprezanja duž cijelog nosača.

S druge strane, moment savijanja, raspodijeljen duž nosača po zakonu **parabole**, izaziva rubna naprezanja raspodijeljena po **istom** zakonu.

Iz toga slijedi da će duž gornjeg ruba vladati **tlačna** rubna naprezanja također parabolasto raspodijeljena duž nosača, s tim što je na krajevima naprezanje jednako **težišnom** naprezanju od sile prednapinjanja ($= \sigma_v$, po početnoj pretpostavci), a u polovištu raspona – **dvostruko**j veličini tog naprezanja.

Dugotrajno djelovanje ovakve raspodjelbe naprezanja moglo bi izazvati nepovoljno **izobličenje** nosača djelovanjem **puzanja**.

2 Uvod

2.7 Načela oblikovanja osi natege

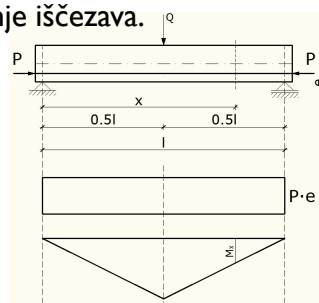
Duž donjeg ruba naprezanja iščezavaju.

Poklopi li se os natege s osi što spaja donje rubove jezgre svih presjeka duž nosača (jezgrena os), stanje će biti znatno povoljnije.

Naime, i sada će raspodjelba tlačnih naprezanja na gornjem rubu bit parabolasta, ali će u polovištu raspona naprezanje biti upola manje, a na krajevima naprezanje iščezava.

Naravno, duž donjeg ruba naprezanja nema, kao ni u prvomu slučaju.

Pogledajmo sada slučaj nosača opterećena pojedinačnom silom u polovištu raspona i prednapeta duž jezgrene osi (slika 2.13). Na slici su predloženi i momenti savijanja.



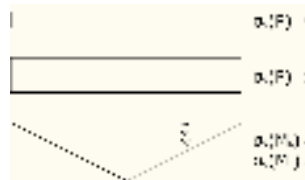
Slika 2.13: Nosač opterećen pojedinačnom silom u $l/2$

2 Uvod

2.7 Načela oblikovanja osi natege

Raspodjelba rubnih naprezanja duž nosača od momenta savijanja sasvim je slična tijeku momenata.

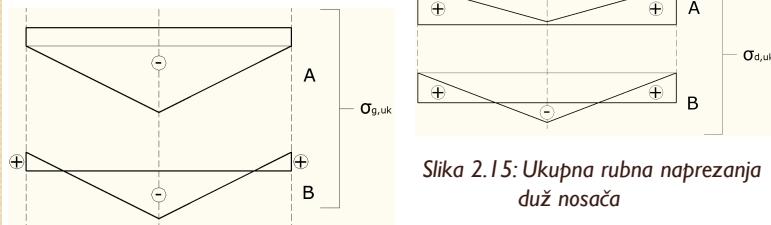
S druge strane, naprezanja su od sile prednapinjanja jednoliko raspodijeljena duž nosača (slika 2.14).



Slika 2.14: Rubna naprezanja duž nosača

Pri tomu na gornjem rubu mogu biti ili tlačna ili vlačna (češće).

Zbrojimo li ta dvojna naprezanja, dobit ćemo stanja predložena na slici 2.15.



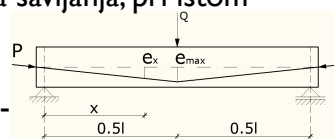
Slika 2.15: Ukupna rubna naprezanja duž nosača

2 Uvod

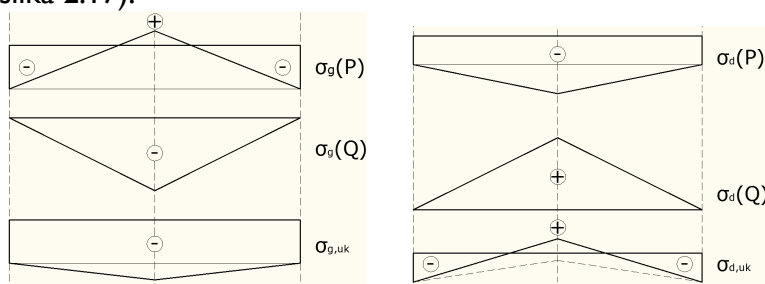
2.7 Načela oblikovanja osi natege

A sada pogledajmo kako sve ovo izgleda u slučaju kada je os natege prilagođena tijeku momenata savijanja, pri istom opterećenju (slika 2.16).

Dok u naprezanjima na gornjem rubu nema većih razlika, ukupna su naprezanja na donjem rubu bitno različita (slika 2.17).



Slika 2.16: Natega slomljene osi



Slika 2.17: Rubna naprezanja za slučaj predložen na slici 2.16; lijevo: gornji rub; desno: donji rub

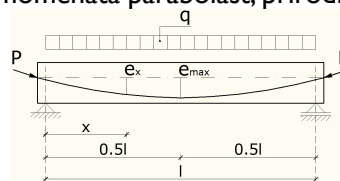
2 Uvod

2.7 Načela oblikovanja osi natege

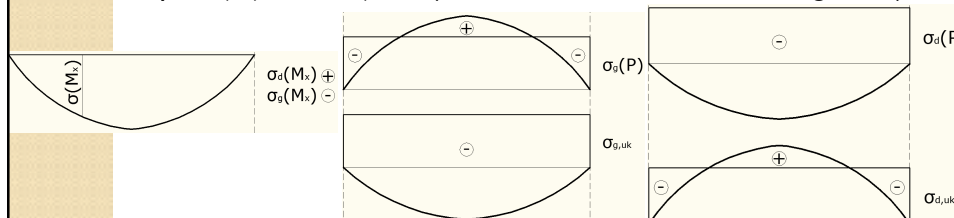
Još nam je preostao slučaj nosača pod jednoliko rasprostrtim opterećenjem. Kako je tada tijekom momenata parabolast, prirodno je da i os natege bude tog oblika (slika 2.18).

Odgovarajuća rubna naprezanja predložena su na slici 2.19.

Uočavamo ne osobito povoljnu raspodjelu naprezanja duž nosača na gornjem rubu, ali zato bitno povoljniju na donjem (s obzirom na narav betona kao gradiva).



Slika 2.18: Natega za jednoliko rasprostrto opt.



Slika 2.19: Rubna naprezanja za slučaj predložen na slici 2.18; lijevo: gornji rub; desno: donji rub

2 Uvod

2.8 Prednosti i nedostatci PB sklopova

Spomenuli smo kako su glavni nedostatci AB kao gradiva:

- sklonost betona raspucavanju i
- nemogućnost iskorištenja betona u vlačnom pojasu.

Nastojanje da se prevladaju ovi nedostatci dovelo je do iznašaća postupaka za izvedbu PB sklopova.

Prednosti su PB kao gradiva sljedeće:

- Raspucavanje se može potpuno spriječiti ili svesti na mjeru pri kojoj se pukotine zatvaraju nakon prestanka preopterećenja, pa su zbog toga PB sklopovi trajniji.
- Manji je utrošak čelika za $40 \div 50$ %, a kojiput i do 80 %.
- Masa je sklopa manja i do 35 %, jer se iskorištava cio ili gotovo cio betonski presjek.
- Progib je PB grede manji i do 70 % od progiba AB grede iste visine.

2 Uvod

2.8 Prednosti i nedostatci PB sklopova

- Raspon PB sklopa može biti i **nekoliko puta veći** od raspona AB sklopa.
- Glavna vlačna naprezanja u priležajnom dijelu grede istog raspona i vanjskog opterećenja mnogo su manja, pa debljina hrpta može biti mnogo manja.
- **Umorna otpornost** PB sklopova osjetno je veća nego u sklopova od drugih gradiva zahvaljujući maloj promjeni naprezanja u čeliku, pa je zbog toga PB vrlo prikladan za izrazito **dinamički** opterećene sklopove (željeznički mostovi, kranske staze itd.).
- Prednapinjanje je omogućilo **sklapanje predgotovljenih dijelova**, pa i njihovo suho spajanje.

2 Uvod

2.8 Prednosti i nedostatci PB sklopova

PB kao gradivo ima i **nedostataka**:

- Nužna je **složena i skupa oprema**.
- Nužna je znatno viša razina izobrazbe radnika.
- Potrebno je gradivo osjetno više kakvoće.
- Nužna je znatno veća točnost proračuna i izvedbe.
- Sidra natega razmjerno su skupa.
- Visoko vrijedni čelik mnogo je neotporniji na hrđanje od betonskoga.

Nabrojeni nedostatci djelomice dokidaju navedene prednosti PB-a kao gradiva.

2 Uvod

2.9 Područje primjene prednapinjanja

Prednapinjanje se primjenjuje u **gotovo svim** područjima graditeljstva.

Prednapinju se oni sklopovi ili njihovi dijelovi što su napregnuti na **vlak** ili **savijanje** ili oni na koje djeluju znatno **mimo-osne tlačne sile**.

Osim toga, prednapinjanje se rabi kada se želi postići **nepropusnost stijenke** i kada je nužno **pridržavanje** sklopova **sidrenjem** (zaštitne stijene građevnih jama, privremeno pridržavanje lukova itd.).