

# EKSPERIMENTALNA I TEORIJSKA ANALIZA SPREGNUTIH NOSAČA DRVO-BETON IZVEDENIH MEHANIČKIM SPOJNIM SREDSTVIMA

Boško STEVANOVIĆ

ORIGINALNI NAUČNI RAD  
UDK: 624.011.6.001.572/575 = 861

## 1. UVOD

Svakodnevne potrebe savremenog građevinarstva postavljaju pred konstruktore i arhitekte sve složenije zahteve, kako u primeni novih materijala, tako i u optimalnom korišćenju tradicionalnih građevinskih materijala, uz primenu novih tehnologija u procesu proizvodnje i tehničkih inovacija u procesu izgradnje, uz ostvarivanje optimalnih zahteva u pogledu estetike i racionalnosti.

Neosporne estetske, konstruktivne, građevinsko-fizičke, a time i ekonomske prednosti savremenih drvenih konstrukcija dolaze do punog izražaja ako se izvrši pravilan izbor oblika konstrukcije, konstruktivnog sistema, metoda projektovanja i načina izgradnje. Za ostvarivanje ovih zahteva neophodno je: što bolje poznavanje i znalacko korišćenje svojstava drveta, primena savremenih tehnologija u izradi drvenih konstrukcija, težnja ka industrijskom načinu izgradnje, dalje osavremenjavanje metoda proračuna kroz intenziviranje naučno istraživačkog rada na upoznavanju fizičkih i mehaničkih karakteristika drveta i sl.

Primeniti pravi materijal na pravom mestu u konstrukciji, na mestu koje mu po njegovim fizičko-mehaničkim karakteristikama najviše odgovara, jedan je od osnovnih zahteva optimalnog projektovanja savremenih građevinskih konstrukcija. Rezultat ovakvih i sličnih razmišljanja je pojava različitih vrsta spregnutih nosača, među kojima nesumnjivo najveću primenu imaju spregnuti nosači čelik-beton.

Dinamički razvoj teorijsko-eksperimentalnih istraživanja "klasično" spregnutih konstrukcija (čelični nosač i betonska ploča) 30-tih i 40-tih godina ovog veka izazvao je intenzivnu i uspešnu primenu ovih, u suštini vrlo racionalnih konstrukcija, s obzirom da se sprežanjem ova dva materijala može postići visok stepen iskorišćenja nosi-

vosti betona na pritisak i čelika na zatezanje. Uporedo sa razvojem istraživanja i primene "klasično" spregnutih konstrukcija čelik-beton javljaju se i drugi oblici sprežanja različitih materijala i konstruktivnih elemenata, među kojima spadaju i spregnute konstrukcije drvo-beton. Drvo kao i čelik ima relativno veliku čvrstoću na zatezanje, pa je upravo ova činjenica dovela do ideje da se ono spregne sa betonom. Rezultat ove ideje su spregnuti nosači od drveta i betona, koji se uspešno primenjuju u konstrukcijama mostova (najviše u Americi i zemljama Pacifika), stambenih zgrada, industrijskih, sportskih i drugih objekata. Pored ovoga sprežanje drveta i betona koristi se pri rekonstrukciji i sanaciji starih međuspratnih drvenih konstrukcija.

Prednosti spregnutih međuspratnih konstrukcija drvo-beton u visokogradnji u odnosu na klasične drvene međuspratne konstrukcije su: veća krutost, veća vatrootpornost, smanjenje vibracija, bolja termička i akustička svojstva. U odnosu na masivnu betonsku ploču, kao međuspratnu konstrukciju ili spregnutu ploču čelik-beton ove konstrukcije imaju znatno manju sopstvenu težinu, a ako su vidljive u prostoru drvene grede daju mnogo bolji arhitektonski izgled i utisak u odnosu na "hladni" čelik. Takođe, ovakve međuspratne konstrukcije su i ekonomski opravdane jer je njihova cena, kao i cena ostalih radova u okviru međuspratne konstrukcije znatno niže nego kod drugih "klasičnih" konstrukcija.

Opravdanost sprežanja drveta i betona pokazana je i dokazana kroz izvedene objekte: mostove, stambene i industrijske zgrade i dr. U domaćoj građevinskoj praksi poznata je primena sprežanja drveta i betona pri sanaciji i rekonstrukciji postojećih drvenih međuspratnih konstrukcija, čime se njihova nosivost povećava oko dva puta a krutost tri do četiri puta. Takođe povećava se i ukupna stabilnost i seizmička otpornost celog objekta jer se na ovaj način dobija kruta međuspratna konstrukcija.

Važeći propisi iz oblasti drvenih i spregnutih konstrukcija, sticajem različitih okolnosti, poslednjih petnaestak godina nisu usaglašavani sa savremenim međunarodnim saznanjima i regulativom. Međutim, imajući u vidu napore koji se čine u domaćoj stručnoj javnosti na

Adresa autora:  
Doc. dr Boško Stevanović, dipl.inž.građ.  
Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu,  
Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd

uvođenju Evrokodova u našu tehničku regulativu, ostaje nada da će se u skorije vreme, u sklopu globalnog projekta usaglašavanja domaće sa međunarodnom regulativom, naći način da se i spregnute konstrukcije drvo-beton makar pomenu u ovim propisima.

U našoj zemlji do sada nisu vršena skoro nikakva eksperimentalna istraživanja spregnutih nosača od drveta i betona, pa je u cilju utvrđivanja karakteristika ovakvih nosača, kao i njihovog ponašanja pri eksploatacionom i graničnom opterećenju, na Građevinskom fakultetu u Beogradu urađna teorijako eksperimentalna studija u okviru koje su izvršena i ispitivanja spregnutih nosača od drveta i betona.

## 2. TIPOVI SPREGNUTIH NOSAČA I SREDSTAVA ZA SPREZANJE DRVETA I BETONA

Sredstva za sprezanje treba da obezbede zajedničko (spregnuto) delovanje dva različita konstruktivna materijala u jedinstvenom spregnutom preseku. Ova sredstva preuzimaju smičuće sile koje nastaju na kontaktu dva elementa i time omogućuju jedinstveno delovanje spregnutog preseka i ostvarivanje pretpostavki na kojima se zasniva analiza napona i deformacija.

Međusobno spajanje elemenata može se izvršiti pomoću:

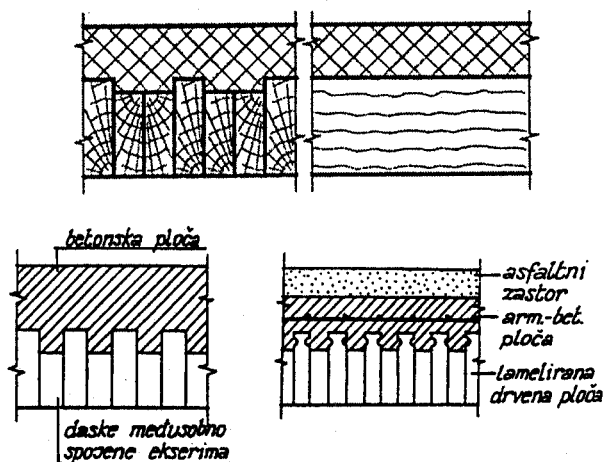
- prirodne athezije i trenja,
- lepljenjem
- mehaničkim moždanicima.

Zbog jednostavnosti primene najčešće se za sprezanje drveta i betona koriste mehanička spojna sredstva (moždanici), iako nije retkost da se upotrebljavaju i hemijska spojna sredstva, odnosno razne vrste lepkova i to uglavnom lepkova na bazi epoksi smole.

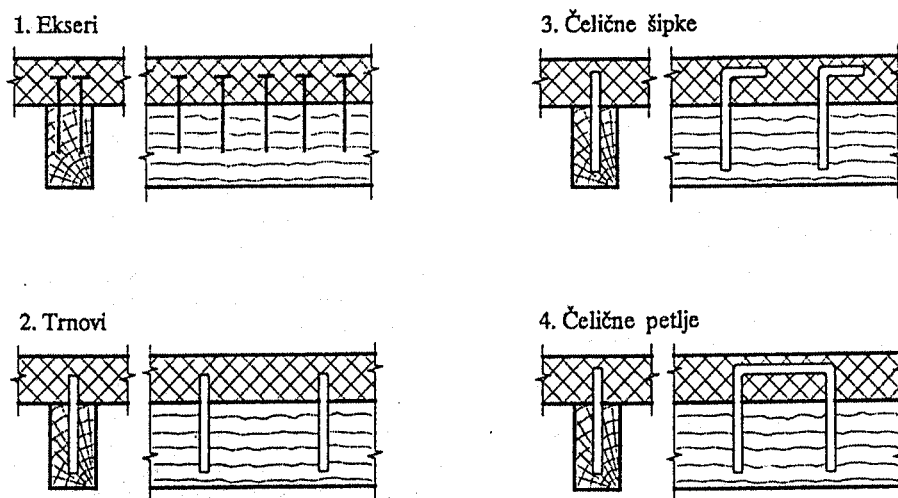
Dva najčešće korišćena tipa spregnute konstrukcije drvo-beton su:

1. Ploče (slika 1 i 3), koje se izrađuju od mehanički spojenih, najčešće ekserima, dasaka postavljenih "na kant", i međusobno naizmenično smaknutih, tako da formiraju podužne žljebove. Preko ovako postavljenih dasaka ugrađuje se betonska ploča koja može biti i armirana, a koja vrši monolitizaciju preseka. Ovaj tip spregnutih konstrukcija najčešće se koristi za kontinualne mostovske ploče;

2. T-grede (slika 2 i 3), gde se drveni nosač koji predstavlja rebro, praktično pomoću različitih vrsta moždanika vezuje za betonsku ploču koja predstavlja flanšu T-preseka. Ploča može biti od nearmiranog, armiranog, prethodnonapregnutog ili keramzit betona. Može biti livena na licu mesta ili prefabrikovana. Spregnute konstrukcije ovog tipa obično se upotrebljavaju kod statičkih sistema prostih greda.

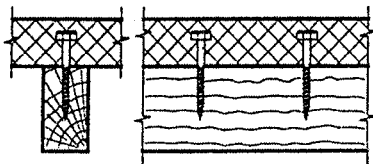


Sl. 1. Spregnute ploče drvo-beton

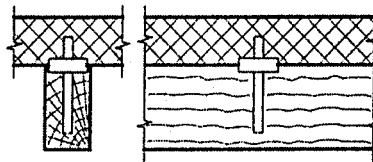


Sl. 2a. Spregnuti nosači drvo - beton (T-grede). Najčešće korišćeni mehanički moždanci

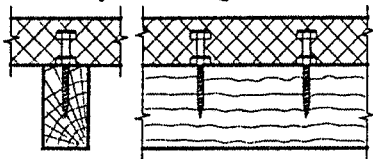
5. Zavrtnjevi



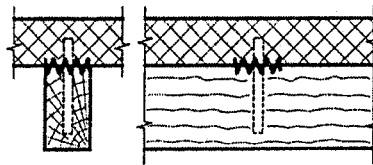
9. Kružne karike



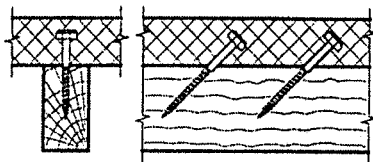
6. Zavrtnjevi sa dve glave



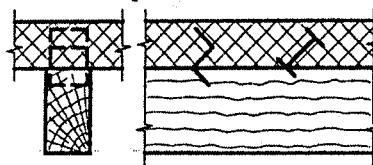
10. Karike "Buldog"



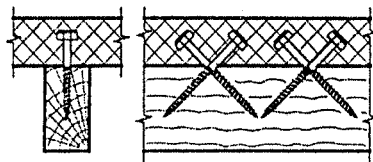
7. Kosi zavrtnjevi



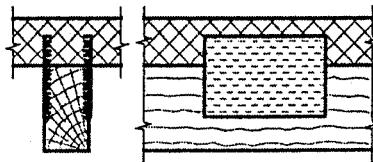
11. Čelični profili



8. Kosi zavrtnjevi

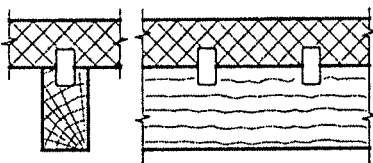


12. Konekter ploče

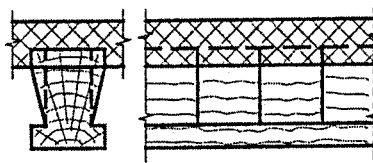


Sl. 2b. Spregnuti nosači drvo - beton (T-grede). Najčešće korišćeni mehanički moždanici

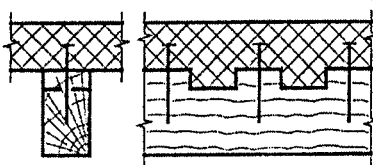
13. Čelične cevi



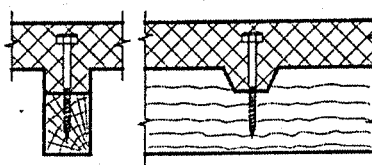
15. Bočni zarezi u drvenoj gredi



14. Zarezi u drvenoj gredi

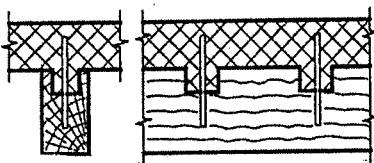


16. Zarez sa zavrtnjevima

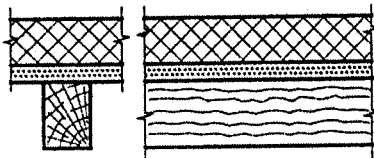


Sl. 3a. Spregnuti nosači drvo - beton. Mehanički moždanici i lepljenje

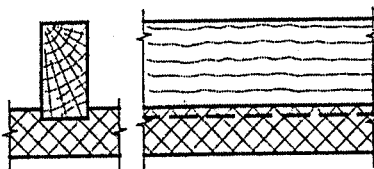
17. Kružne rupe u drvenoj gredi



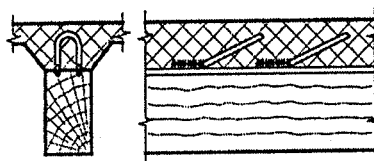
18. Lepljeni spoj sa međuslojem



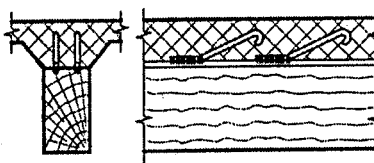
19. Lepljeni spoj



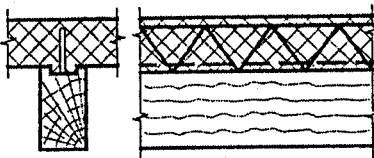
20. Čelične petlje zavarene za podužnu armaturu



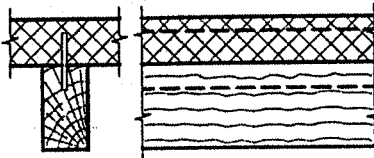
21. Čelične petlje zavarene za podužnu armaturu



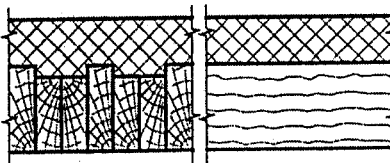
22. Čelična rešeta zalepljena za drvenu gredu



23. Čelični lim zalepljen za drvenu gredu



24. Spregnuta ploča



Sl. 3b. Spregnuti nosači drvo – beton. Mehanički moždanici i lepljenje

Izbor moždanika koji će se upotrebiti za sprezanje od velike je važnosti jer bitno utiče na ponašanje veze između drveta i betona, odnosno stepena sprezanja tj. sadejstva ova dva materijala.

Koji će se moždanik upotrebiti za sprezanje zavisi od više faktora, kao što su: vrsta odnosno tip spregnutog nosača, konstrukcija objekta i uticaj sprezanja na ukupno ponašanje konstrukcije pod dejstvom eksploatacionih i drugih opterećenja, način ugradnje moždanika, ovde se pre svega misli na jednostavnost ugradnje, ekonomski faktori vezani za cenu moždanika i cenu njihove ugradnje i dr.

### 3. ISPITIVANJE SPREGNUTIH NOSAČA DRVO – BETON

Dosadašnja relativno mala, kako teorijska, tako i eksperimentalna istraživanja u oblasti sprezanja drveta i

betona nisu dala sve odgovore na mnogobrojna pitanja koja ova problematika postavlja, a među kojima se naročito ističu:

- metoda sprezanja betonske ploče sa drvenim nosačem koja obuhvata izbor načina sprezanja i proračun veze,

- analiza naponskog i deformacijskog stanja,
- izvođenje konstrukcija ove vrste.

U cilju utvrđivanja nekih karaktristika spregnutih nosača drvo – beton, kao i njihovog ponašanja pri eksploatacionom i graničnom opterećenju, na Građevinskom fakultetu u Beogradu, izvršeno je ispitivanje nekoliko spregnutih nosača drvo – beton, gde su kao sredstva za sprezanje korišćeni mehanički moždanici – ekseri i zavrtnjevi.

Obavljenim eksperimentalnim istraživanjima obuhvaćene su praktično tri međusobno povezane grupe ispitivanja:

1. Ispitivanje fizičkih i mehaničkih karakteristika materijala ugrađenih u spregnute nosače drvo-beton (drvo, beton, sredstva za sprezanje).

2. Određivanje modula pomerljivosti između drveta i betona za različite tipove veza, odnosno sprezanja.

3. Ispitivanje spregnutih nosača drvo-beton izvedenih različitim tipovima mehaničkih spojnih sredstava.

### 3.1 Ispitivanje fizičkih i mehaničkih karakteristika materijala ugrađenih u spregnute nosače drvo-beton

Ispitivani spregnuti nosači drvo – beton izvedeni su kao spregnuti T presek sa rebrom od lepljenog lameliranog drveta, jelovine I klase i pločom od armiranog betona MB30. Međusobna veza rebra i ploče ostvarena je ekserima E50/150 i zavrtnjima za drvo bez navrtke Ø10/150.

Saglasno gore navedenim materijalima i spojnim sredstvima izvršeno je i ispitivanje njihovih elastomehaničkih karakteristika. Sva ispitivanja karakteristika materijala urađena su saglasno važećim JUS standardima.

Za lepljeno lamelirano drvo ispitane su sledeće karakteristike: modul elastičnosti pri statičkom savijanju, čvrstoća na pritisak paralelno vlaknima, čvrstoća na zatezanje paralelno vlaknima, čvrstoća na smicanje paralelno vlaknima, čvrstoća na savijanje, čvrstoća na pritisak upravno na vlakna, čvrstoća na zatezanje upravno na vlakna, zapreminska masa.

Za spojna sredstva izvršeno je ispitivanje čvrstoće na zatezanje, da bi se proverile i potvrdile njihove deklarisanе karakteristike date od strane proizvođača.

Za beton je ispitana čvrstoća na pritisak i modul elastičnosti. Sva ispitivanja rađena su na kockama i prizmama koje su uzete prilikom betoniranja nosača i negovane u uslovima koji su propisani u odgovarajućim standardima.

### 3.2 Određivanje modula pomerljivosti veze drvo - beton za različita spojna sredstva

Kao što je već rečeno za sprezanje drvenog rebra i betonske ploče korišćeni su ekseri E50/150 i zavrtnji za drvo bez navrtke Ø10/150. Da bi se odredio modul

pomerljivosti konstruisani su posebni modeli za ispitivanje.

Obzirom da ne postoje, ni u svetu ni kod nas, propisane norme, niti standardi za spregnute konstrukcije drvo-beton samim tim ne postoji ni propisani model za određivanje modula pomerljivosti. Postoje modeli koji je svaki od autora konstruisao odnosno oblikovao prema sopstvenoj ideji i potrebama.

Dimenzije i oblik modela koji su predloženi u ovom radu proizašli su iz analize dosadašnjih modela, saglasni su sa preporukama Evrokoda 4, a praktični su za upotrebu. Modeli su relativno laki (40 kg), jednostavni su za izradu, manipulaciju i ispitivanje, a daju i sasvim zadovoljavajuće rezultate, koji se mogu praktično primeniti za proračun.

U konkretnom slučaju određen je modul pomerljivosti za četiti tipa veze:

Tip EP - ekseri E50/150 zabijeni upravno na podužnu osu modela - uzorka na međusobnom razmaku od 10 cm - "pravi" ekseri.

Tip EK - ekseri E50/150 zabijeni naizmenično, pod uglom od 45°, u odnosu na podužnu osu modela - uzorka na razmaku od 10 cm - "kosi" ekseri.

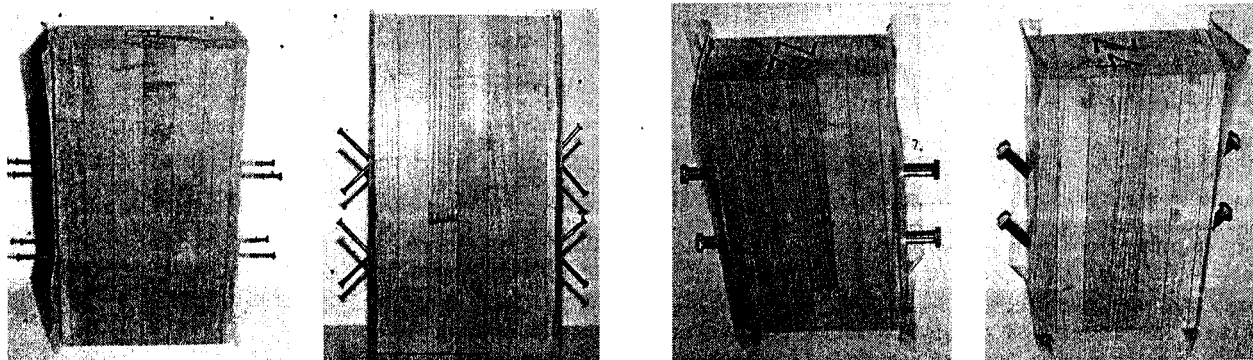
Tip ZP - zavrtnjevi za drvo bez navrtke Ø10/150 ušrafljeni upravno na podužnu osu modela - uzorka, na međusobnom razmaku od 10 cm - "pravi" zavrtnjevi.

Tip ZK - zavrtnjevi za drvo bez navrtke, ušrafljeni pod uglom od 45° u odnosu na podužnu osu modela - uzorka, na međusobnom razmaku od 10 cm - "kosi" zavrtnjevi.

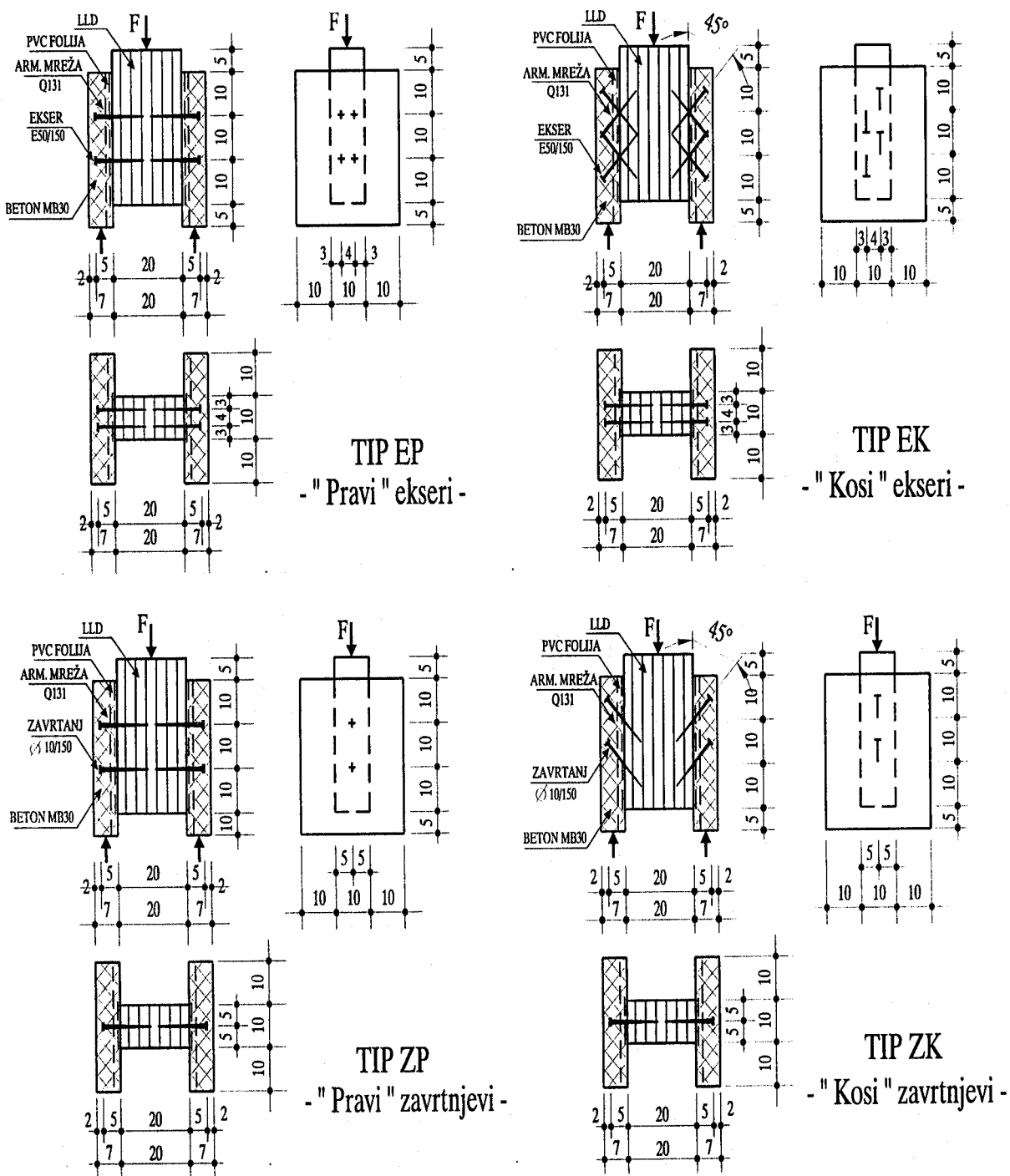
Napravljeno je ukupno 12 uzoraka za ispitivanje modula pomerljivosti i to za svaki od navedenih tipova veze po tri identična uzorka.

Oblik i dimenzije modela prikazane su na slikama 4 i 5.

Ispitivanje modela izvršeno je posle 28 dana od njihove izrade, odnosno betoniranja. Položaj induktivnih ugibomera i modela za vreme ispitivanja prikazan je na slici 5. Sila je aplicirana na drveni deo modela preko čeličnog podmetača debljine 20 mm koji je bio postavljen preko celog preseka drveta. Ova debljina podmetača omogućila je ravnomerno prenošenje sile po preseku. Model (betonski deo) je bio oslonjen na ravnu horizontalnu čeličnu ploču. Sila je nanošena hidrauličkom panj presom nosivosti 100 kN, a intenzitet sile meren je pomoću dozne nosivosti 250 kN sa tačnošću merenja od 0,01 kN.



Sl. 4. Izgled drvenog dela modela sa ugrađenim spojnim sredstvima - "pravi" ekseri, "kosi" ekseri, "pravi" zavrtnjevi i "kosi" zavrtnjevi



Sl. 5. Oblik i dimenzije modela za određivanje modula pomerljivosti

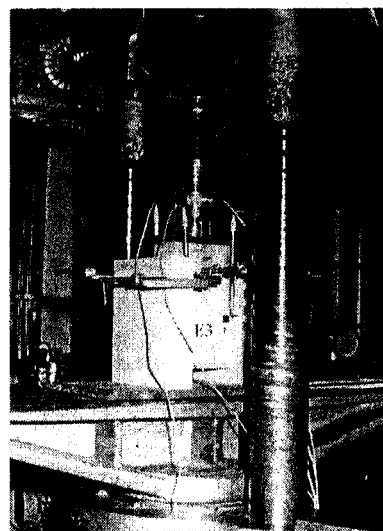
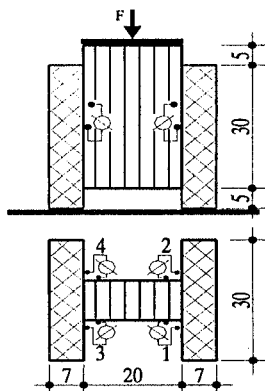
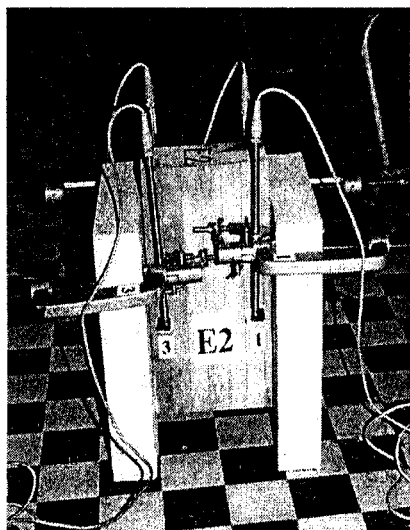
Za merenje pomeranja (smicanja) između betona i drveta korišćeni su induktivni ugibomeri W20TK proizvodnje Hottinger Baldwin, sa opsegom merenja od  $\pm 30$  mm. Ugibomeri su bili pričvršćeni pomoću metalnih stezača za betonski deo, a vrh ugibomera bio je oslonjen na male aluminijumske ugaonike koji su bili zalepljeni na drvo (slika 6). Za svaki model korišćeno je četiri ugibomera, po dva sa svake strane u blizini spoja drveta

i betona, kako bi se što preciznije registrovala pomeranja i kako bi se mogle uočiti i eventualne neravnomernosti u pomeranjima. Merenje pomeranja vršeno je na polovini visine uzorka.

Procedura nanošenja opterećenja izvedena je u skladu sa Evropskim standardom EN 26891, koji predviđa nanošenje opterećenja u roku od 2 min. do 0,4 od graničnog opterećenja, zadržavanje na tom

intenzitetu 30 sec, vraćanje opterećenja na 0,1 od graničnog sa zadržavanjem od 30 sec i najzad opterećivanje do postizanja graničnog opterećenja ili

pomeranja od 15 mm. Ukupno vreme ispitivanja treba da se završi za 10-15 min.



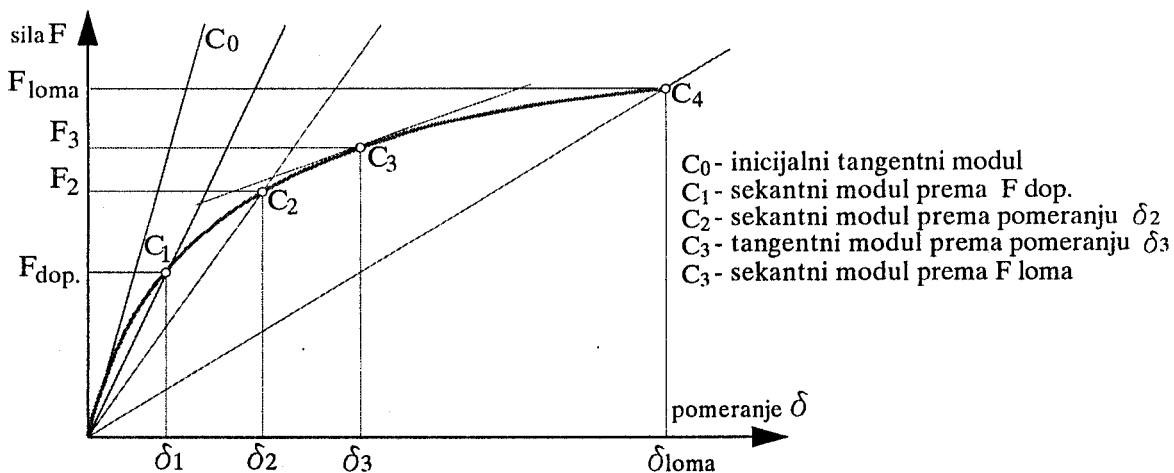
Sl. 6. Položaj induktivnih ugibomera na modelu i ispitivanje modela za određivanje modula pomerljivosti veze drvo-beton

Na osnovu dosadašnjih eksperimentalnih istraživanja veze drvo-beton kao i na osnovu izvedenih eksperimenata može se zaključiti da promena pomeranja sa promenom opterećenja nije linearna, odnosno da dijagram  $F-\delta$  nije linearan, pa samim tim ni modul pomerljivosti  $C$  nije konstantan, veće se menja za svaku tačku dijagrama.

Modul pomerljivosti može se definisati kao sekantni ili tangentni, a u odnosu na određeni nivo opterećenja ili

u odnosu na usvojenu veličinu pomeranja u vezi (slika 7).

Obradom podataka, sa ispitivanja modela koja su izvršena na način kako je to prethodno opisan, dobijeni su dijagrami sila-pomeranje ( $F-\delta$ ) za svaki od ispitanih uzoraka. Jedan od dobijenih dijagrama (za model E2) prikazan je na slici 8. Kao što se sa slika može videti oblik dijagrama je nelinearan.



Sl. 7. Određivanje modula pomerljivosti  $C$

U konkretnom slučaju ispitivanje je vršeno prema standardu EN 26891 - Veze ostvarene mehaničkim spojnim sredstvima - opšti principi za određivanje nosivosti i deformacionih karakteristika. Prema ovom standardu kao maksimalnu silu pri ispitivanju treba uzeti silu loma ili silu pri pomeranju od 15 mm. Pri tome modul

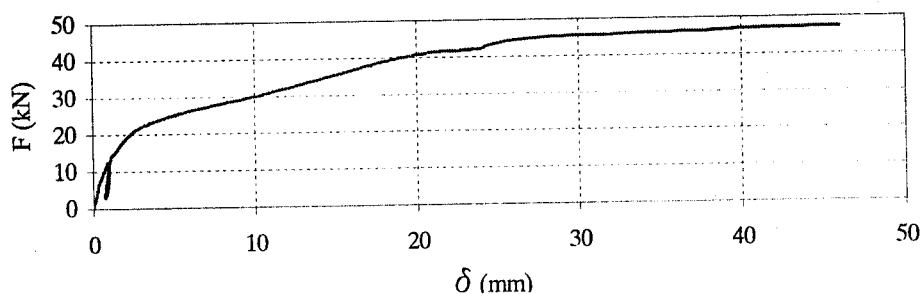
pomerljivosti  $C_s$  treba odrediti kao sekantni, za nivo opterećenja  $0,4 F_{est}$  (za dokaz upotrebljivosti), gde je  $F_{est}$  procenjena maksimalna sila, a za dokaz nosivosti treba uzeti modul pomerljivosti  $C_u = 2/3 C_s$ . Ovaj način određivanja modula pomerljivosti dat je i u preporukama Evropske komisije za drvene konstrukcije u Publikaciji

STEP 1 (Structural Timber Education Programme), pa je kao takav usvojen i u ovom radu.

Na osnovu prethodno opisane metodologije određivanja modula pomerljivosti C, uz korišćenje

dijagrama kakav je dat na slici 8. sračunate su vrednosti modula C za nivo opterećenja,  $0,4F_{est}$  i određene srednje vrednosti za svaki tip modela (Tabela 1).

## E2



Sl. 8. Eksperimentalno određeni dijagram  $F - \delta$  za model E2 ("pravi" ekseri)

Tabela 1. Moduli pomerljivosti za ispitane modele sračunati na osnovu  $F-\delta$  dijagrama

| MODEL    |    | $F_{max}$ | $\frac{F_{max}}{n}$ | $\delta_{max}$ | $0,4F_{est}$ | $\delta_{04}$ | $\delta_{01}$ | $\delta_{i,mod}$ | $C_s$   | $sr C_s$ | $sr C_u$ |
|----------|----|-----------|---------------------|----------------|--------------|---------------|---------------|------------------|---------|----------|----------|
| (UZORAK) |    | [kN]      | n [kN]              | [mm]           | n [kN]       | [mm]          | [mm]          | [mm]             | [kN/mm] | [kN/mm]  | [kN/mm]  |
| Tip EP   | E2 | 35,54     | 4,44                | 15,00          | 1,50         | 0,96          | 0,22          | 0,99             | 1,52    | 1,71     | 1,14     |
|          | E3 | 37,42     | 4,68                | 15,00          | 1,42         | 0,73          | 0,17          | 0,75             | 1,89    |          |          |
| Tip EK   | E4 | 30,31     | 3,79                | 15,00          | 1,71         | 0,95          | 0,14          | 1,08             | 1,58    | 2,71     | 1,80     |
|          | E5 | 29,41     | 3,68                | 15,00          | 1,50         | 0,87          | 0,08          | 1,05             | 1,43    |          |          |
|          | E6 | 27,05     | 3,38                | 10,50          | 1,56         | 0,50          | 0,01          | 0,65             | 2,40    |          |          |
| Tip ZP   | Z1 | 43,11     | 10,78               | 15,00          | 3,92         | 1,75          | 0,72          | 1,37             | 2,86    | 2,58     | 1,72     |
|          | Z2 | 41,88     | 10,47               | 15,00          | 3,70         | 1,32          | 0,02          | 1,73             | 2,14    |          |          |
|          | Z3 | 42,80     | 10,70               | 15,00          | 3,73         | 1,45          | 0,43          | 1,36             | 2,74    |          |          |
| Tip ZK   | Z4 | 45,28     | 11,32               | 2,48           | 3,84         | 0,86          | 0,15          | 0,95             | 8,04    | 29,24    | 19,49    |
|          | Z5 | 47,50     | 11,75               | 1,25           | 5,00         | 0,38          | 0,08          | 0,40             | 12,50   |          |          |
|          | Z6 | 95,00     | 23,75               | 4,90           | 7,39         | 0,42          | 0,34          | 0,10             | 67,20   |          |          |

### 3.3. Ispitivanje spregnutih nosača drvo-beton izvedenih različitim tipovima mehaničkih spojnih sredstava

Ispitivanjima o kojima je ovde reč obuhvaćeno je ukupno deset spregnutih nosača od drveta i betona. Osm nosača ispitano je na tzv. kratkotrajno opterećenje do loma, a dva su ispitana i još uvek se ispituju na dugotrajno opterećenje. Namera je da se ova dva nosača ispituju nekoliko godina kako bi se utvrdilo njihovo ponašanje pod dugotrajnim opterećenjem.

Nosači su bili statičkog sistema prosta greda, raspona 4,0m, opterećeni koncentrisanim silama u trećinama raspona. Poprečni presek nosača bio je spregnuti T presek, sa rebrom od lepljenog lameliranog drveta dimenzija  $b/h = 10/20\text{cm}$  i flanšom od betona širine 60 i debljine 7cm. Projektovana marka betona bila je MB30, a beton je bio lako armiran mrežom Q131

(slika 9). U cilju provere usvojenih dimenzija drvene grede, izvršena je i prethodna orijentaciona analiza napona i deformacija međuspratne drvene konstrukcije sistema proste grede raspona 4,0 m sa glavnim nosačima od lepljenog lameliranog drveta dimenzija 10/20 cm na međusobnom razmaku od 60 cm. Ova analiza urađena je za opterećenje prema važećim propisima, stalno i korisno ( $2,0 \text{ kN/m}^2$ ).

Debljina betonske ploče od 7 cm usvojena je kao minimalna, prema preporukama važećeg JUS standarda, a u cilju što manje sopstvene težine celog nosača.

Širina betonske ploče  $b_a$  od 60 cm usvojena je iz analize dosadašnjih istraživanja spregnutih konstrukcija drvo-beton kao i Evrokoda 4 za spregnute konstrukcije od čelika i betona.

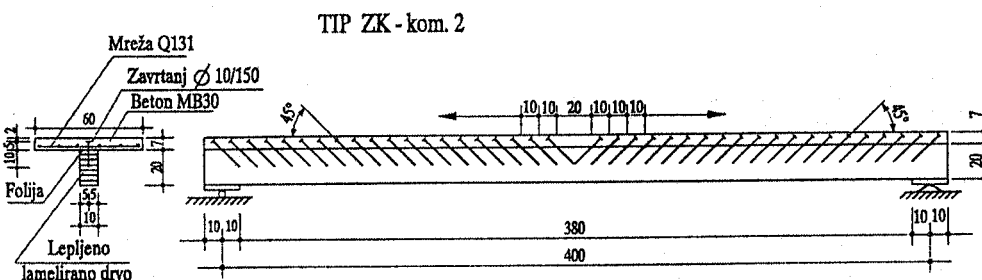
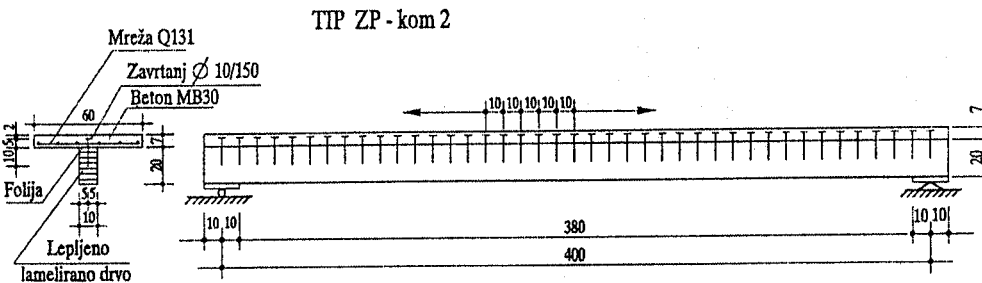
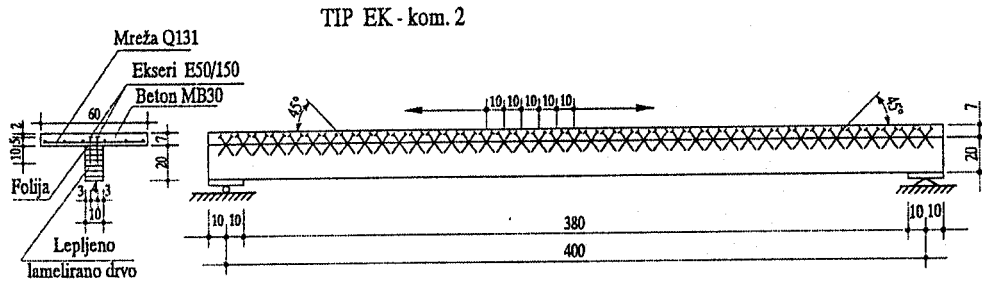
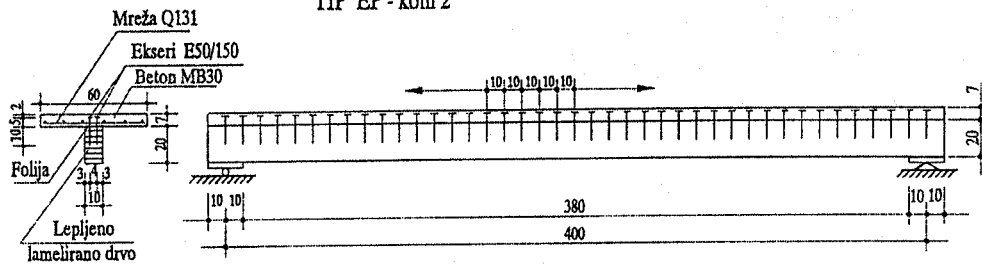
Svi nosači su betonirani na licu mesta, u grupama od po četiri komada, u samoj hali gde su i vršena



ispitivanja (slika 10). Dimenzije nosača i njihovog poprečnog preseka rezultirale su iz činjenice da model za ispitivanje bude u razmeri 1:1 u odnosu na realne nosače koji se uobičajeno koriste u međuspratnim

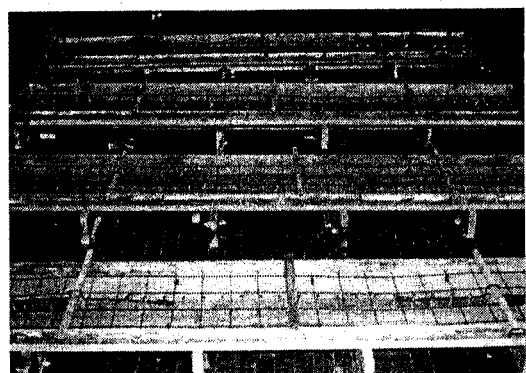
konstrukcijama zgrada.

Obzirom da ponašanje celokupnog spregnutog preseka pod opterećenjem u najvećoj meri zavisi od sredstava za sprezanje, odnosno moždanika, koji svojom



Sl. 9. Geometrija ispitivanih spregnutih nosača

krutošću utiču na modul pomerljivosti, a samim tim i na napone i deformacije, to je ovim eksperimentom obuhvaćeno više spojnih sredstava, odnosno više varijanti njihovog položaja u vezi između drveta i betona. Za sprezanje su korišćena mehanička spojna sredstva, ekseri E50/150, postavljeni, u jednom slučaju, upravno na podužnu osu nosača na međusobnom razmaku od 10cm, a u drugom slučaju, naizmenično, pod uglom od 45° u odnosu na ovu osu, takođe na razmaku od 10cm. Kao drugo spojno sredstvo korišćeni su zavrtnjevi za drvo bez navrtke Ø10/150, postavljeni na sličan način kao i ekseri (slika 11). Ispitivana su po dva nosača sa istim tipom sprezanja.



Sl. 10. Spregnuti nosači neposredno pre betoniranja

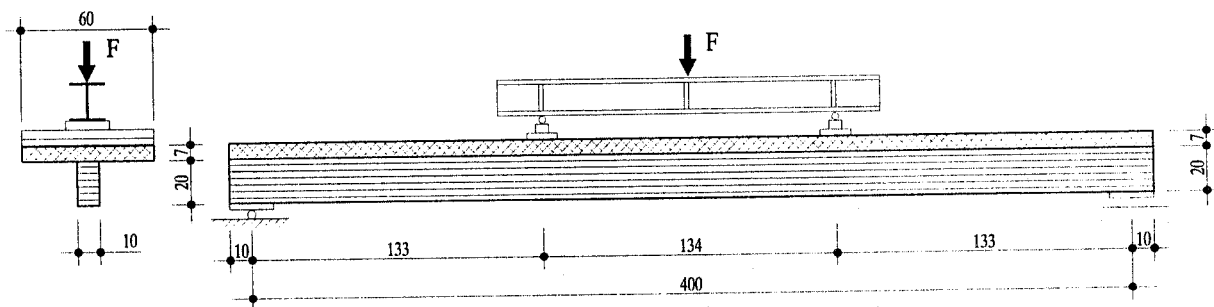


Sl. 11. Detalji ugrađenih spojnih sredstava ("pravi" ekseri, "kosi" ekseri, "pravi" zavrtnjevi i "kosi" zavrtnjevi)

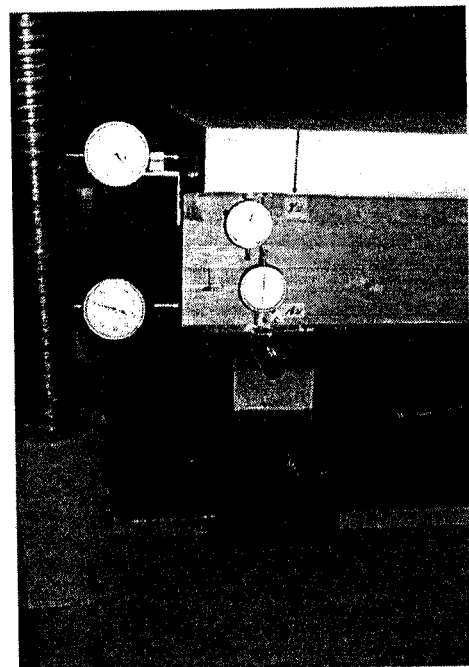
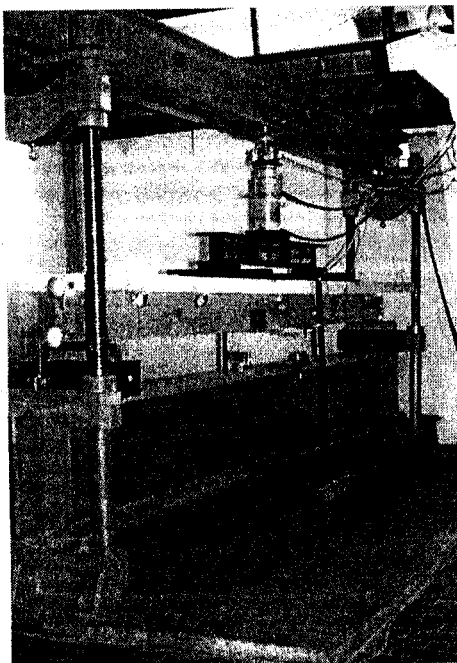
### 3.3.1. Ispitivanje spregnutih nosača

Ispitivanje spregnutih nosača izvršeno je u zatvorenom čeličnom ramu. Nosači su opterećivani koncentrisanim silama u trećinama raspona (slika 12). Ovakvim rasporedom sila u srednjoj trećini preseka dobijen je konstantan moment savijanja, a u krajnjim trećinama konstantne transverzalne sile. Opterećenje je

na ovim mestima bilo aplicirano putem jedne hidrauličke panj prese nosivosti 350 kN, preko jakog čeličnog profila (IP 160) i čeličnih oslonačkih elemenata (slika 13 levo). Oslonački delovi nosača su se preko metalnih ploča debljine 8 cm, čije su dimenzije određene tako da ne dođe do gnječenja drveta, oslanjali na adekvatno izvedene oslonce od čelika - pokretni i nepokretni (slika 13 desno).



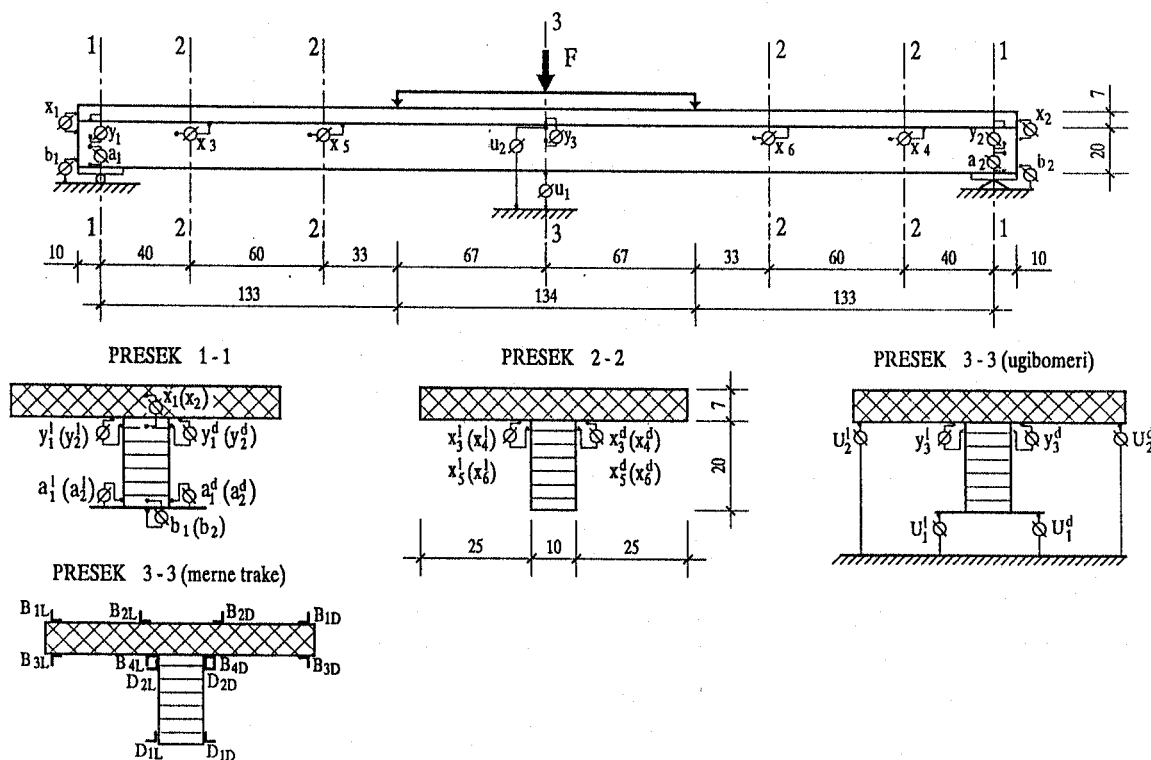
Sl. 12. Dispozicija nosača i opterećenja



Sl. 13. Spregnuti nosač u ramu za ispitivanje (levo) i detalj nepokretnog oslonca (desno)

Kao što je već rečeno cilj ispitivanja bio je da se utvrdi ponašanje ovako spregnutih nosača pri eksploatacionom i graničnom opterećenju. U tu svrhu korišćen je odgovarajući standard za ispitivanje, kao i odgovarajuća merina tehnika, odnosno instrumenti. Standard po kome je vršeno nanošenje i merenje opterećenja je EN 26981- Opšti principi za određivanje nosivosti i deformacionih karakteristika veza ostvarenih mehaničkim spojnim sredstvima. Za merenje deformacija (ugiba) korišćeni su ugibomeri (26 komada)

sa bazom od 1/100 i 1/1000 mm, za merenje dijatacija u betonu i drvetu korišćene su merne trake (12 komada), proizvođača Tokyo Sokki Kenkyujo Co, iz Japana, i to tip PL-60-11 za beton, a tip L-60-11 za drvo. Ugibomerima je praćena ukupna deformacija nosača, kao i pomeranje – smicanje između betonske ploče i drvenog rebra u više preseka (slika 14), a mernim trakama je praćena dilatacija u betonu i drvetu u sredini nosača. Za svo vreme su u hali, na mestu ispitivanja, merene vlažnost i temperatura vazduha.

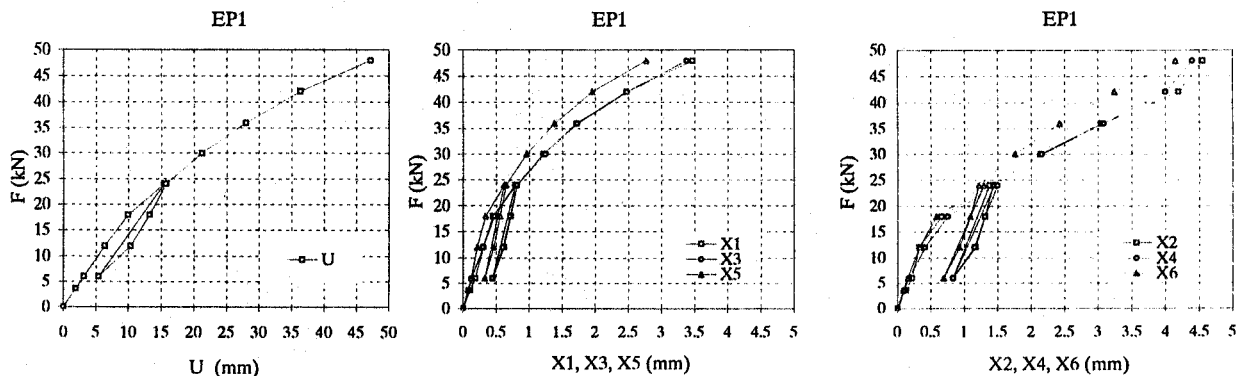


Sl. 14. Dispozicija nosača sa rasporedom mernih mesta

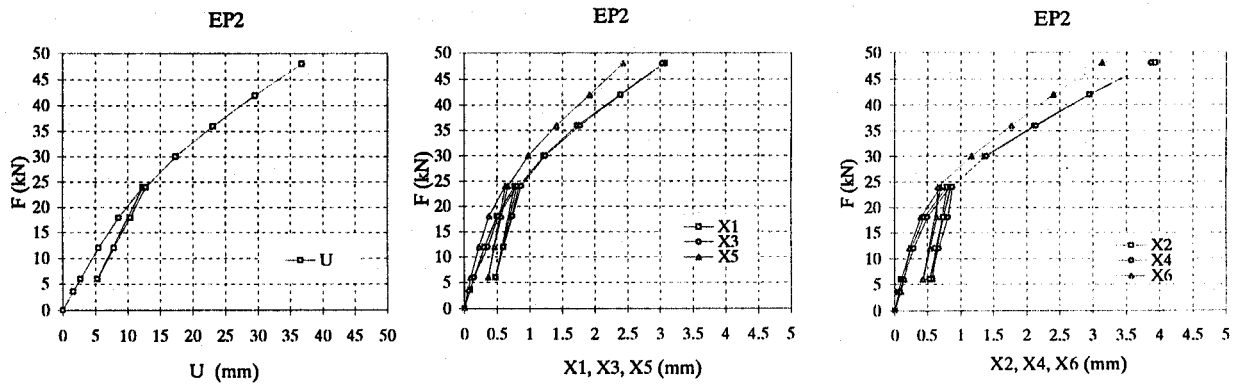
### 3.3.2. Rezultati ispitivanja spregnutih nosača

Kao rezultati ovih ispitivanja dobijene su vrednosti napona i deformacija u spregnutim nosačima drvo-beton za različite tipove veza i nivoe opterećenja, kako u elastičnoj, tako i u plastičnoj oblasti (slika 15 i 16). Pojam deformacije u ovom poglavlju označava sva merena

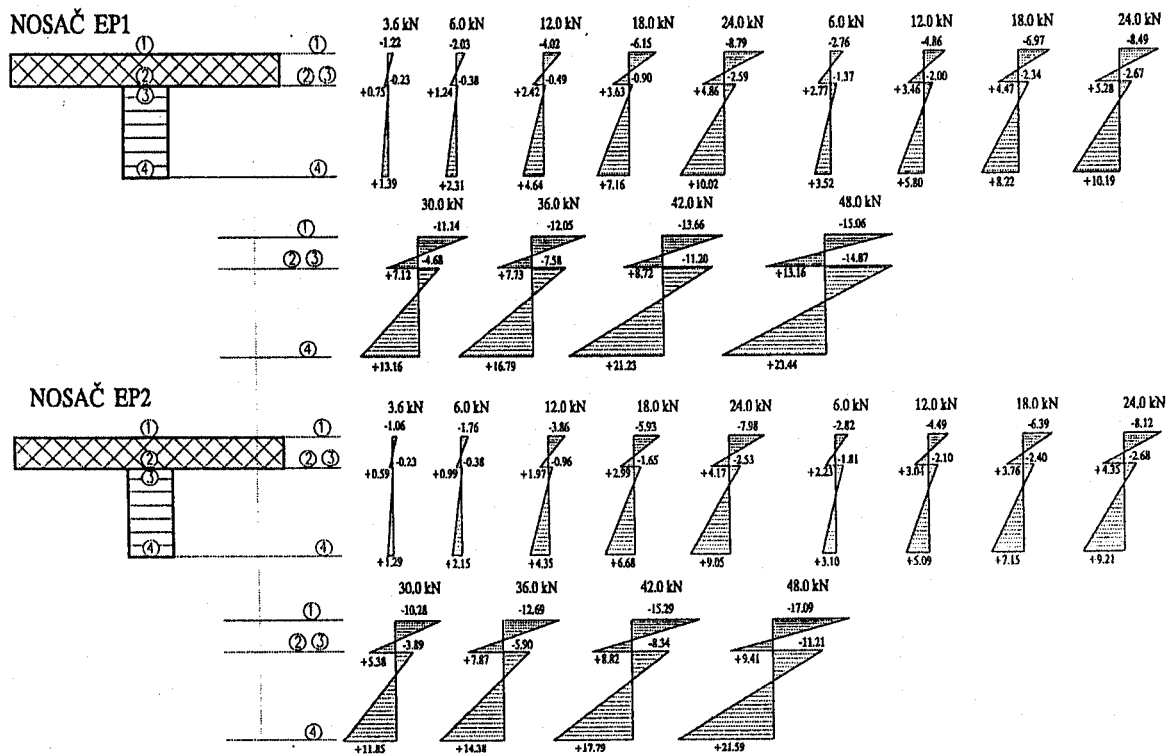
pomeranja u karakterističnim presecima, odnosno na karakterističnim mestima na nosaču i to: vertikalno razmicanje između betona i drveta u presecima na osloncu i u sredini nosača, proklizavanje (smicanje) između betona i drveta, vertikalno pomeranje oslonačkih delova nosača, horizontalno pomeranje oslonačkih delova nosača i ugib u sredini nosača



Sl. 15a. Eksperimentalno dobijeni dijagrami ugiba  $U$  i pomeranja  $X1 - X6$  za nosače EP1



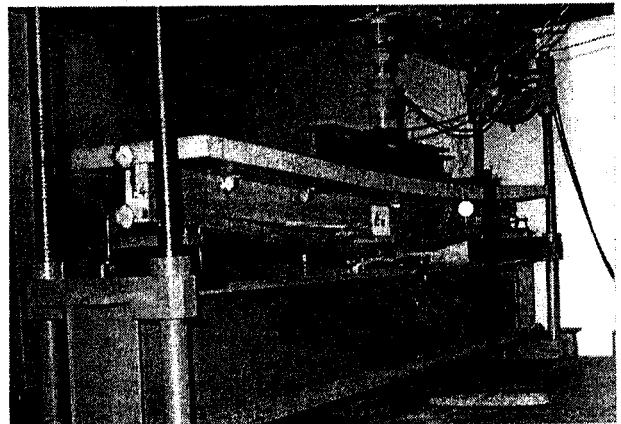
Sl. 15b. Eksperimentalno dobijeni dijagrami ugiba U i pomeranja X1 – X6 za nosače EP2



Sl. 16. Dijagrami napona u MPa, po fazama opterećenja za presek na polovini raspona za nosače EP1 i EP2

Dobijeni su, takođe, i oblici loma nosača. Lom nosača uvek se dešavao u srednjoj terćini, na donjoj ivici drvenog dela (slika 17). Ovaj lom nastajao je zbog prekoračenja napona zatezanja u drvetu. Pre ovog loma javljale su se prsline na donjoj ivici betonske ploče, takođe u srednjoj terećini i to, skoro redovno, prvo ispod aplicirane sile, a kasnije i u ustalom delu srednje zone nosača.

Ova ispitivanja pokazala su da se sprežanjem drveta i betona može značajno povećati nosivost i krutost drvenih greda. Ove karakteristike u mnogome zavise od vrste upotrebljenog spojnog sredstva, njegovih karakteristika, kao i načina ugradnje. U konkretnom slučaju najmanju krutost i nosivost imali su nosači gde su kao spojna sredstva korišćeni ekseri, vertikalno zabijeni u drvenu gredu, a najveći, zavrtjniji zabijeni pod uglom od 45° u odnosu na podužnu osu nosača i to naizmenično.



Sl. 17. Izgled loma jednog od ispitivanih nosača

Naravno da se upotrebom drugačijih spojnih sredstava mogu karakteristike krutosti i nosivosti još više povećati, ali ovde treba imati na umu i ekonomičnost tako spregnutih nosača. Ova ekonomičnost u velikoj meri je rezultat cene spojnih sredstava, načina odnosno komplikovanosti njihove izrade i ugradnje, kao i vreme koje je potrebno za izradu ovih nosača.

Konkretni eksperimenti rađeni su sa nosačima i spojnim sredstvima koja su za naše uslove najekonomičnija. Dostupna su svakom izvođaču, lako i brzo se ugrađuju, a za njihovu ugradnju nije potrebna kvalifikovana radna snaga, tako da ovi i ovakvi nosači mogu biti konkurentni na tržištu. Osim toga ovi nosači mogu se raditi i u fabrici, kao prefabrikovani proizvod određenih karakteristika, ali isto tako i na licu mesta, na konkretnoj lokaciji.

#### 4. ANALITIČKA METODA PRORAČUNA SPREGNUTIH NOSAČA PO TEORIJI ELASTIČNOG SPREZANJA

Svi spregnuti nosači od drveta i betona, gde se kao sredstva za sprezanje koriste mehanički moždanici, usled spoljašnjeg opterećenja, kao što je već rečeno, imaju izvesna pomeranja u spoju. Ova pomeranja zavise od vrste upotrebljenih spojnih sredstava, njihovog razmaka, načina oblikovanja i ugradnje i dr. Kada se kao spojno sredstvo upotrebi lepak, ovakva veza smatra se krutom, odnosno sprezanje je potpuno pa se tako dobijeni poprečni presek može smatrati jedinstvenim i na njega se može primeniti teorija krutog sprezanja koja se svodi na klasične postupke proračuna monolitnog preseka. Međutim, pri upotrebi mehaničkih spojnih sredstava javlja se delimično (elastično) sprezanje, pa se za proračun ovakvih preseka mora uzeti u obzir pomeranje (klizanje) u spoju između drveta i betona, odnosno mora se primeniti teorija elastičnog sprezanja.

Pri proračunu elastično spregnutih nosača drvo-beton uvode se sledeće pretpostavke:

- drvo, beton i spojna sredstva si izotropni, elastični materijali i važi Hukov zakon;

- važi Bernulijeva hipoteza, odnosno ravni preseki i posle deformacije ostaju ravni i upravni na deformisanu osu peseka. Ova hipoteza kod elastično spregnutih preseka u principu ne važi za ceo presek, ali važi za svaki od elemenata;

- spojna sredstva postavljena su na konstantnom razmaku i mogu se smatrati kao ekvivalentna kontinualna veza sa konstantnom krutošću spoja duž celog nosača;

- poprečni preseki betona i drveta su konstantni duž raspona;

- drvo i beton imaju jednake ugibe u svakoj tački spoja;

- aksijalna sila deluje u težištu betonskog preseka.

Kao najopštiji slučaj, ovde se razmatra spregnuti nosač drvo-beton sistema proste grede opterećen proizvodnim spoljnim opterećenjem  $q(x)$  i konstantnom normalnom silom  $H$ , slika 18a. Uslovi ravnoteže dela nosača levo od preseka  $n-n$  (slika 18b) daju:

$$\Sigma F_x = 0 \Rightarrow N_b + N_d - H = 0, \quad (1)$$

$$\Sigma F_z = 0 \Rightarrow T_b + T_d + R_A - \int_0^x q(t) dt = 0, \quad (2)$$

odnosno

$$T_b + T_d = T_x \quad (3)$$

$$\Sigma M_K = 0 \Rightarrow M_b + M_d - N_b r + H r - R_A x + \int_0^x (x-t) q(t) dt = 0 \quad (4)$$

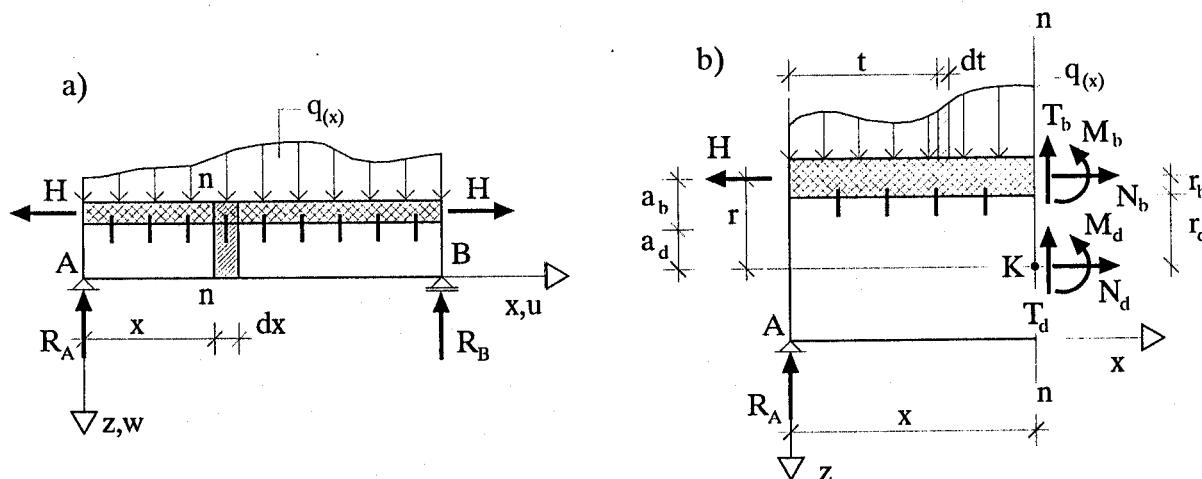
odnosno

$$M_b + M_d - N_b r = M_x - H r. \quad (5)$$

U gornjim jednačinama je:

$$T_x = \int_0^x q(t) dt - R_A, \quad (6)$$

$$M_x = R_A x - \int_0^x (x-t) q(t) dt \quad (7)$$



Sl. 18. Spregnuti nosač drvo-beton - opterećenje (a) i presečne sile (b)

Iz uslova ravnoteže diferencijalno malog elementa  $dx$  na rastojanju  $x$  od koordinatnog početka, slika 19, sledi:

$$T_x = - \frac{d N_b}{d x}. \quad (8)$$

Pošto je normalna sila  $H$  konstantna duž raspona onda je:

$$\frac{dH}{dx} = 0. \quad (9)$$

Iz uslova ravnoteže dalje sledi:

$$T_x = \frac{dM_x}{dx} \quad (10)$$

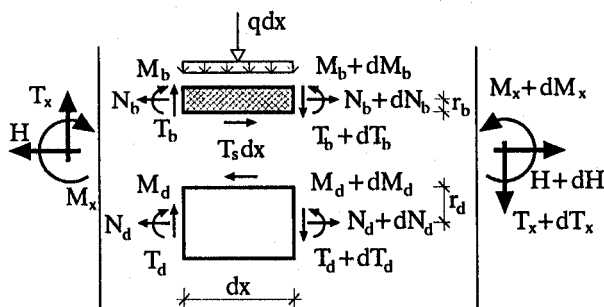
$$T_b = T_s r_b + \frac{dM_b}{dx} \quad (11)$$

$$T_d = T_s r_d + \frac{dM_d}{dx} \quad (12)$$

Ako pretpostavimo da je krivina betonskog i drvenog dela preseka ista i zanemarimo deformacije usled smičućih sila i skraćenja ose nosača, krivina se može izraziti kao:

$$w'' = -\frac{M_b}{E_b J_b} = -\frac{M_d}{E_d J_d}, \quad (13)$$

gde su  $E_b J_b$  i  $E_d J_d$  - krutosti na savijanje betonskog, odnosno drvenog preseka.



Sl. 19. Presečne sile na diferencijalnom elementu

Kombinacijom jednačina 1,5 i 13 dobijamo momente savijanja betona i drveta:

$$M_b = \frac{E_b J_b}{EJ_o} [M_x - (H - N_b) r] \quad (14)$$

$$M_d = \frac{E_d J_d}{EJ_o} [M_x - (H - N_d) r] \quad (15)$$

U ovim jednačinama je:

$$(EJ)_o = E_b J_b + E_d J_d, \quad (16)$$

što predstavlja krutost na savijanje za nespregnuti presek.

Iz uslova kompatibilnosti deformacija na spoju između drveta i betona, slika 20, ukupno pomeranje u vezi u aksijalnom pravcu je:

$$\Delta u = du_d - du_b + w' r, \quad (17)$$

gde su  $du_b$  i  $du_d$  diferencijalna pomeranja betonskog, odnosno drvenog dela preseka usled aksijalnih sila i dobijaju se preko izraza:

$$du_b = \frac{N_b dx}{A_b E_b} \quad (18)$$

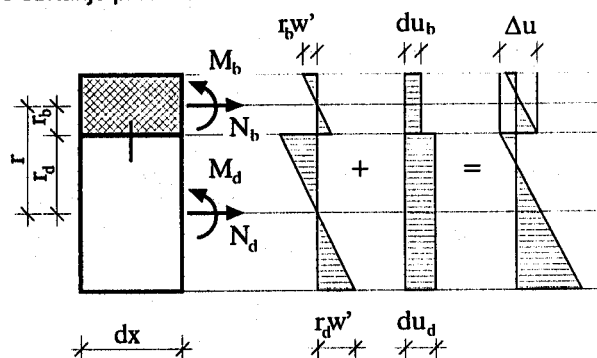
$$du_d = \frac{N_d dx}{A_d E_d} \quad (19)$$

Ukupno pomeranje  $\Delta u$  jednako je odnosu smičuće sile u spoju  $T_s$  i krutosti spoja  $c$ , odnosno:

$$\Delta u = \frac{T_s}{c} = -\frac{dN_b}{dx} \cdot \frac{1}{c} \quad (20)$$

Krutost spoja  $c$ , predstavlja odnos modula pomerljivosti  $C$  i razmaka spojnih sredstava  $e$  ( $c=C/e$ ).

U gornjim jednačinama su:  $A_b E_b$ ,  $A_d E_d$  - aksijalne krutosti betonskog, odnosno drvenog dela preseka, a  $w'$  je obrtanje preseka.



Sl. 20. Raspored dilatacija u preseku

Diferencirajući jednačinu 17 i uzimajući u obzir 18, 19 i 20 dobija se:

$$\Delta \varepsilon = \varepsilon_d - \varepsilon_b + w'' r, \quad (21)$$

gde je:

$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta u}{dx} = -\frac{d^2 N_b}{dx^2} \cdot \frac{1}{c} \quad \text{- ukupna dilatacija;} \quad (22)$$

$$\varepsilon_b = \frac{du_b}{dx} = \frac{N_b}{A_b E_b} \quad \text{- podužna dilatacija u betonu;} \quad (23)$$

$$\varepsilon_d = \frac{du_d}{dx} = \frac{N_d}{A_d E_d} \quad \text{- podužna dilatacija u drvetu.} \quad (24)$$

Iz jednačine 13 i 14, dobija se da je:

$$w'' = -\frac{[M_x - (H - N_b) r]}{(EJ)_o} \quad (25)$$

Kombinacijom jednačina 21 - 24 dobija se osnovna diferencijalna jednačina problema u funkciji normalne sile u betonu:

$$\frac{d^2 N_b}{dx^2} - \alpha^2 N_b = \beta M_x - \gamma H, \quad (26)$$

gde je:

$$\alpha^2 = c \left( \frac{1}{A_b E_b} + \frac{1}{A_d E_d} + \frac{r^2}{(EJ)_o} \right), \quad (27)$$

$$\beta = \frac{c \cdot r}{(EJ)_o}, \quad (28)$$

$$\gamma = c \left( \frac{1}{A_b E_b} + \frac{r^2}{E J_o} \right). \quad (29)$$

Kombinacijom jednačina 25 i 26 dobija se diferencijalna jednačina četvrtog stepena po pomeranjima  $w$  za spregnuti nosač drvo-beton sistema proste grede koji je opterećen u svemu prema slici 18:

$$w^{IV} - \alpha^2 w^{II} = \frac{\alpha^2 M_x}{(EJ)_\infty} - \frac{M_x^{II}}{(EJ)_o} - \frac{\alpha^2 H a_{bzo}}{(EJ)_\infty}, \quad (30)$$

gde je:

$$(EJ)_\infty = \frac{(EJ)_o}{\alpha^2 - \beta r} = E_d J_d + E_b J_b + \frac{r^2 E_d A_d \cdot E_b A_b}{E_d A_d + E_b A_b}, \quad (31)$$

što predstavlja krutost na savijanje kod punog spreznjanja,

$$i_{a_{bzo}} = \frac{r(\alpha^2 - \gamma)}{(\alpha^2 - \beta r)} = \frac{r E_b A_b}{E_d A_d + E_b A_b}, \quad (32)$$

što predstavlja rastojanje težišta ukupnog kruto spregnutog preseka od težišta betonskog dela preseka.

Opšte rešenje diferencijalne jednačine 30 može se napisati u obliku:

$$w = a_1 \sinh(\alpha x) + a_2 \cosh(\alpha x) + a_3 x + a_4 + w_p, \quad (33)$$

gde su  $a_1 - a_4$  konstante koje zavise od graničnih uslova (uslova oslanjanja), a  $w_p$  partikularno rešenje koje zavisi od spoljašnjeg opterećenja.

Kada je poznato rešenje za  $w$ , za date granične uslove, unutrašnje presečne sile lako se mogu sračunati. Iz jednačine 13 slede momenti u betonskom, odnosno drvenom delu preseka:

$$M_b = -w^{II} E_b J_b \quad (34)$$

$$M_d = -w^{II} E_d J_d \quad (35)$$

Ubacujući 35 u 14 dobija se normalna sila u betonu:

$$N_b = \frac{Hr - M_x - w^{II}(EJ)_o}{r}, \quad (36)$$

a iz 36 i 1 sledi normalna sila u drvetu:

$$N_d = \frac{M_x + w^{II}(EJ)_o}{r}. \quad (37)$$

Sila smicanja između betona i drveta dobija se kombinacijom jednačina 36 i 8 kao:

$$T_s = \frac{M^I + w^{III}(EJ)_o}{r}. \quad (38)$$

Jednačine 33 do 38 predstavljaju opšte izraze za ugib, odnosno sile u preseku elastično spregnutog nosača drvo-beton.

Kada je spregnuti nosač opterećen samo poprečnim opterećenjem onda je  $N_b = -N_d = N$ , tada diferencijalna jednačina 26 dobija sledeći oblik:

$$\frac{d^2 N}{dx^2} - \alpha^2 \cdot N + \beta \cdot M_x = 0, \quad (39)$$

a diferencijalna jednačina 30 prelazi u jednačinu

$$w^{IV} - \alpha^2 w^{II} = \alpha^2 \frac{M_x}{(EJ)_\infty} - \frac{M_x^{II}}{(EJ)_o}. \quad (40)$$

Ne ulazeći u matematički problem rešavanja diferencijalne jednačine 40, obzirom da se u literaturi može naći njeno rešenje za različite slučajeve opterećenja, ovde se, u Tabeli 2, daju izrazi za normalne i smičuće sile za neke karakteristične slučajeve opterećenja.

Rešavanjem diferencijalne jednačine 40 za različite granične uslove oslanjanja nosača i različito opterećenje, dobija se ugib  $w$ , a preko njega i momenti i normalne sile u drvenom odnosno betonskom delu preseka. Takođe, moguće je odrediti i silu smicanja između drveta i betona.

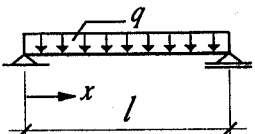
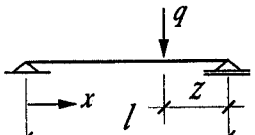
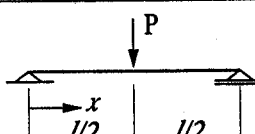
Naponi u drvetu i betonu mogu se sračunati prema poznatim stavovima otpornosti materijala:

$$\sigma_b = \frac{M_b}{J_b} \cdot y + \frac{N_b}{A_b}, \quad \text{odnosno,} \quad (41)$$

$$\sigma_d = \frac{M_d}{J_d} \cdot y + \frac{N_d}{A_d}.$$

Rešavanje diferencijalne jednačine 40 predstavlja zametan posao pogotovu za komplikovanije slučajeve opterećenja i oslanjanja, pa je za određivanje naprezanja u elastično spregnutim nosačima u praksi usvojen pojednostavljen način proračuna takozvani  $\gamma$  - postupak ili  $\gamma$  - metod.

Tabela 2. Normalne i smičuće sile za karakteristične slučajeve opterećenja

| Opterećenje   |                      | Normalna sila  | Smičuća sila   |
|---|----------------------|--|--|
|  | $x \leq l$           | $N_x = \frac{\beta}{\alpha^2} \cdot M_x \left[ 1 - 2 \frac{\cosh \alpha \frac{1}{2} - \cosh \alpha \left( \frac{1}{2} - x \right)}{x(1-x)\alpha^2 \cdot \cosh \alpha \frac{1}{2}} \right]$ | $T_x = \frac{\beta}{\alpha^2} \cdot T_x \left[ 1 - \frac{\sinh \alpha \left( \frac{1}{2} - x \right)}{\left( \frac{1}{2} - x \right) \cdot \alpha \cdot \cosh \alpha \frac{1}{2}} \right]$ |
|  | $x \leq l$<br>$z$    | $N_x = \frac{\beta}{\alpha^2} \cdot M_x \left[ 1 - \frac{1 \cdot \sinh \alpha z}{\alpha z \sinh \alpha l} \sinh \alpha x \right]$  | $T_x = \frac{\beta}{\alpha^2} \cdot T_x \left[ 1 - \frac{1 \cdot \sinh \alpha z}{z \cdot \sinh \alpha l} \cosh \alpha x \right]$   |
|  | $x \leq \frac{1}{2}$ | $N_x = \frac{\beta}{\alpha^2} \cdot M_x \left[ 1 - \frac{\sinh \alpha x}{\alpha x \cosh \alpha \frac{1}{2}} \right]$   | $T_x = \frac{\beta}{\alpha^2} \cdot T_x \left[ 1 - \frac{\cosh \alpha x}{\cosh \alpha \frac{1}{2}} \right]$  |

Ovaj postupak prvi je primenio Möhler, daleke 1956. godine, razmatrajući problem pomerljivosti veze drvenih elemenata spojenih mehaničkim spojnim sredstvima. Ovaj postupak bazira se na rešavanju diferencijalne jednačine pomeranja za prostu gredu sa konstantnom krutošću spoja duž raspona, na koju deluje opterećenje po sinusnoj funkciji ( $q=q_0 \cdot \sin \pi x/l$ ), zato što za ovakvo opterećenje postoji jednostavno rešenje u zatvorenom obliku. Usvojeno je da se  $\gamma$  - postupak može primeniti i na druge vrste opterećenja jer je uticaj razlike između tačnog rešenja diferencijalne jednačine i  $\gamma$  - postupka na napone mnogo manji u poređenju sa uticajem koji ima varijacija modula elastičnosti ili modula pomerljivosti veze. Proračun nosača složenog preseka koji su spojeni mehaničkim spojnim sredstvima po ovom postupku dat je i u Evrokodu 5, Aneks B, ali za veze drvo-beton i ploče na bazi drveta-drvo. Uz male modifikacije on se može primeniti i na spregnute nosače drvo-beton.

U skladu sa preporukama u Aneksu B, Evrokoda 5 naponi u poprečnom preseku elastično spregnutog

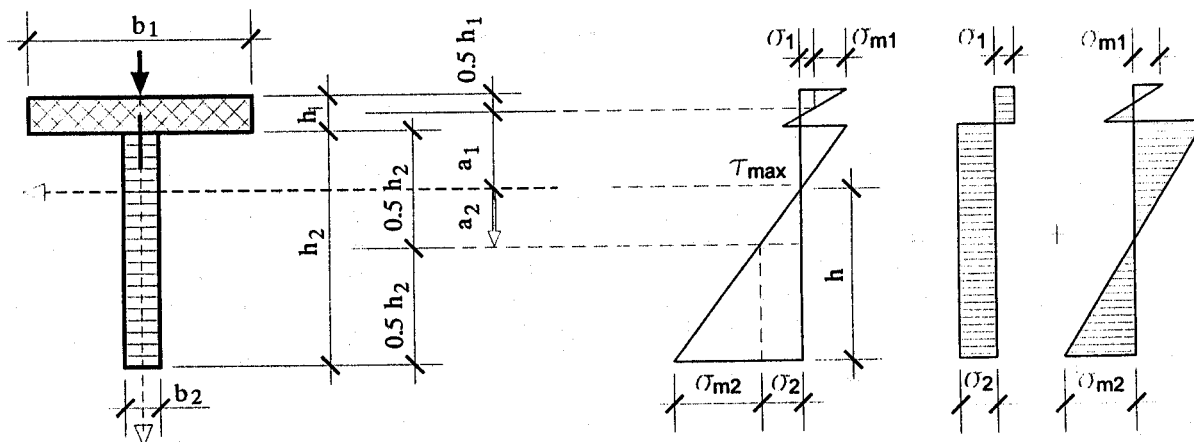
nosača sa oznakama u svemu prema slici 21 mogu se sračunati onako kako je to dato u daljem tekstu.

Metod proračuna zasnovan je na teoriji linearne elastičnosti i na sledećim pretpostavkama:

- nosači su sistema proste grede raspona l. Isti izrazi mogu se primeniti i na kontinualne nosače, ako se za l uzme 0,8 od odgovarajućeg raspona, odnosno na konzolne nosače, ako se za l uzme dvostruka dužina konzole;

- betonski i drveni deo preseka su iz jednog komada;
- drvo i beton su međusobno spojeni mehaničkim spojnim sredstvima sa modulom pomerljivosti C;
- rastojanje spojnih sredstava e je konstantno ili je jednako promenljivo saglasno transverzalnoj sili;
- opterećenje deluje u z pravcu i daje transverzalnu silu  $T=T(x)$  i moment  $M=M(x)$  koji se menja saglasno sinusoidi ili parabolli;

- sve veličine na slici 21 su pozitivne, sem  $a_2$ , koja se uzima kao pozitivna kako je prikazano na slici.



Sl. 21. Geometrijske karakteristike i naponi u elastično spregnutom nosaču



Za presek prikazan na slici 21 sa pločom od betona (indeks 1) i rebrom od drveta (indeks 2) efektivna krutost  $(EJ)_{ef}$  računa se prema sledećem izrazu:

$$(EJ)_{ef} = \sum_{i=1}^2 (E_i J_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2), \quad (42)$$

gde je  $E_i$  modul elastičnosti betona odnosno drveta,  $A_i = b_i h_i$  - površina odgovarajućeg poprečnog preseka,  $I_i = b_i h_i^3 / 12$  - moment inercije poprečnog preseka betona odnosno drveta,

$$\gamma_1 = [1 + \pi^2 E_1 A_1 e / (C \cdot I^2)]^{-1} \quad \text{i} \quad \gamma_2 = 1, \quad (43)$$

$$a_2 = \gamma_1 E_1 A_1 (h_1 + h_2) / 2 \sum_{i=1}^2 \gamma_i E_i A_i, \quad (44)$$

$$a_1 = 0,5 (h_1 + h_2) - a_2, \quad (45)$$

$a_1$  i  $a_2$  su rastojanja težišta betonskog i drvenog preseka od neutralne ose.

Sa gore usvojenim oznakama napone u preseku treba sračunati prema sledećim izrazima:

$$\sigma_i = \gamma_i E_i a_i M / (EJ)_{ef} \quad \text{i} \quad (46)$$

$$\sigma_{m,i} = 0,5 E_i h_i M / (EJ)_{ef}. \quad (47)$$

Ako se u obzir uzima slabljenje poprečnog preseka onda napone  $\sigma_i$  treba pomnožiti faktorom  $A_i / A_{in}$ , a napone  $\sigma_{m,i}$  faktorom  $l_i / l_{in}$ .  $A_i$  i  $A_{in}$  su bruto odnosno neto površina odgovarajućeg preseka, a  $l_i$  i  $l_{in}$  moment inercije bruto odnosno neto poprečnog preseka.  $M$  je moment savijanja nosača na mestu gde se sračunavaju naponi.

Maksimalni smičući napon javlja se na mestima gde su normalni naponi jednaki nuli. Ako neutralna linija "pada" u drveni deo preseka, što je po pravilu slučaj, onda se maksimalni smičući napon računa prema izrazu:

$$\tau_{2,max} = 0,5 E_2 b_2 h T / [b_2 (EJ)_{ef}], \quad (48)$$

gde je  $T$  - transversalna sila u preseku, a  $h$  je rastojanje od donje ivice drvenog dela preseka do neutralne ose.

Sila koja deluje na spojna sredstva računa se prema izrazu:

$$F_1 = \gamma_1 E_1 A_1 a_1 e T / (EJ)_{ef}, \quad (49)$$

gde je  $e$  razmak spojnih sredstava.

## 5. ZAKLJUČAK

Na osnovu svega gore navedenog, i na osnovu sveobuhvatne analize do sada primenjivanih modela za ispitivanje modula pomerljivosti veze drvo-beton, predložen je oblik modela za ispitivanje ovog modula. Ovaj model jednostavan je za izradu, manipulaciju i ispitivanje;

Rezultati ispitivanja spregnutih nosača drvo-beton pokazuju opravdanost sprezanja čak i za veoma elastično sprezanje kakvo je ostvareno kod ispitivanih nosača, jer je njihova nosivost u odnosu na nespregnuti nosač znatno povećana, a deformabilnost smanjena. Povećanje nosivosti je značajnije kod "krućeg" sprezanja

što je i dokazano ispitivanjima (nosivost nosača spregnutih kosim zavrtnjevima veća je u odnosu na nosače spregnute pravim zavrtnjevima i ekserima);

Iz svega iznetog očigledna je kompleksnost problematike konstruisanja, proračuna i primene spregnutih konstrukcija od drveta i betona, ali sa druge strane, teorijsko-eksperimentalna analiza i izvedeni objekti jasno ukazuju na prednosti koje se konstrukterima pružaju u ovoj oblasti.

U čovekovo je prirodi da rešava postojeće probleme i teži ka novim saznanjima. U tom smislu dosadašnja istraživanja spregnutih konstrukcija drvo-beton predstavljaju dovoljno bogatu riznicu konstruktorskih zaključaka i smernica za dalji rad u ovoj oblasti, ali i pored toga oblast sprezanja drveta i betona je nedovoljno istražena što predstavlja jedinstven izazov za buduće istraživače.

## 6. LITERATURA

- [1] BS EN 26891- Timber structures - joints made with mechanical fasteners - General principles for the determination of strength and deformation characteristics, CEN, 1991.
- [2] Ceccotti, A., Covan, C.: "Different Technology of Timber/Concrete Composite Structures Used in Various Countries", Proceedings of the RILEM Symposium: Timber-Concrete Composite Structures", Ravenna, Italy, June 1992., Chap. 2.1.
- [3] Evrokod 4: Proračun spregnutih konstrukcija od čelika i betona, Deo 1.1: Opšta pravila i pravila za proračun zgrada, GF Niš, GF Beograd, 1996.
- [4] Godycki, T., Pawlica, J., Kleszczewski, J.: "Verbunddecke aus Holzrippen and Betonplatte", Bauingenieur 59, 1984., s. 477-483.
- [5] Hoefft, M.: "Analysis at Already Made Laboratory Tests of Timber/Concrete Composite Structures", Proceedings of the RILEM Symposium: Timber-Concrete Composite Structures", Ravenna, Italy, June 1992., Chap. 2.3.
- [6] Stevanović, B., Gojković, M., Stojić, D.: "Design of Composite Timber - Concrete Beams", Časopis Facta Universitatis, series Architecture and Civil Engineering, Vol. 1, No 2, 1995., pp. 167-177.
- [7] Stevanović, B.: "Analiza spregnutih nosača od drveta i betona", Magistarska teza, Građevinski fakultet Beograd, juni 1994.
- [8] Stevanović, B.: "Analysis, Calculation and Practical Use of Composite Action of Timber Beams and Reinforced Concrete Plate Connected by Nails", Proceedings of the Second Pacific Timber Engineering Conference, Auckland, New Zealand, Aug. 1989., Vol. 1, pp. 465-474.
- [9] Stevanović, B.: "Elastically Coupled Timber-Concrete Beams", International Wood Engineering Conference, New Orleans, USA, Oct. 1996., Vol. 3, pp. 3425-3431.
- [10] Stevanović, B.: "Practical Use of Composite Timber - Concrete Beams Connected by Nails", The Fifth World Conference on Timber Engineering, Lausanne, Switzerland, Aug. 1998., Vol. 4, pp. 256-263.
- [11] Stevanović, B.: "Praktična primena nosača drvo-beton spregnutih pomoću eksera", 10. Kongres JDGK, Vrnjačka Banja, juni 1998, knjiga T, str. 265-271.

- [12] Stevanović, B.: "Spregnute konstrukcije drvo-beton", Stručni seminar: Savremena građevinska praksa '99, FTNIIG - Novi Sad, mart 1999., str. 103-118.
- [13] Stevanović, B.: "Spregnuti nosači drvo-beton", Časopis "Izgradnja" br. 2-3, februar-mart 2000., str. 59-65.

- [14] Stevanović, B.: "Ponašanje spregnutih nosača tipa drvo-beton izvedenih mehaničkim spojnim sredstvima pri eksploatacionom i graničnom opterećenju", Doktorska disertacija, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2003.

#### REZIME:

### EKSPERIMENTALNA I TEORIJSKA ANALIZA SPREGNUTIH NOSAČA DRVO-BETON IZVEDENIH MEHANIČKIM SPOJNIM SREDSTVIMA

Boško STEVANOVIĆ

Svakodnevne potrebe savremenog građevinarstva postavljaju pred konstruktore i arhitekte sve složenije zahteve, kako u primeni novih materijala, tako i u optimalnom korišćenju tradicionalnih građevinskih materijala, uz primenu novih tehnologija u procesu proizvodnje i tehničkih inovacija u procesu izgradnje, uz ostvarivanje optimalnih zahteva u pogledu estetike i racionalnosti.

Primeniti pravi materijal na pravom mestu u konstrukciji, na mestu koje mu po njegovim fizičko-mehaničkim karakteristikama najviše odgovara, jedan je od osnovnih zahteva optimalnog projektovanja savremenih građevinskih konstrukcija. Rezultat ovakvih i sličnih razmišljanja je pojava različitih vrsta spregnutih nosača, među kojima nesumnjivo najveću primenu imaju spregnuti nosači čelik-beton. Međutim, poslednjih godina u svetu je sve prisutniji jedan novi oblik sprezanja, gde se umesto čelika, u spregnutom nosaču, koristi drvo.

U radu je dat prikaz osnovnih karakteristika spregnutih nosača drvo-beton, prikazan je postupak ispitavanja ovih nosača izvedenih mehaničkim spojnim sredstvima. Prikazani su neki od rezultata koji su dobijeni pri ovim ispitivanjima. Pored eksperimentalnog istraživanja data je i analitička metoda proračuna po teoriji elastičnog sprezanja i preporukama Evrokoda 5.

Ključne reči: drvo, beton, ekser, zavrtanj, veza, spregnuti nosač, sredstva za sprezanje, modul pomerljivosti.

#### SUMMARY:

### EXPERIMENTAL AND THEORETICAL ANALYSIS OF TIMBER - CONCRETE COMPOSITE BEAMS WITH MECHANICAL CONNECTORS

Boško STEVANOVIĆ

Common needs of contemporary civil engineering put forward for constructors and architects more complex demands in the applications of new materials as well as optimal use of traditional engineering materials, with the use of new technologies in the process of manufacture and technical innovations, with accomplishing optimal demands in terms of aesthetics and rationalization.

To use right material at the right place in the structure, at the place which suits the best its physical and mechanical characteristics is one of the crucial demands of optimal design of contemporary civil engineering structures. The result of such thinking is the break-through of composite beams, among which with no doubt the prevailing application have composite structures steel-concrete. However in the recent years new model of composite beams is becoming more popular in the world, where the steel beam is replaced with wood.

This paper deals with the principal characteristics of wood-concrete composite beams, as well as testing of a model with mechanical connectors. Some of the results obtained are presented. Besides, the experimental results presented, analytical method design according to the elastic theory and Eurocode 5, is given.

Key words: wood, concrete, nail, bolt, connection, composite beam, shear connectors, slip modulus.