

Modeliranje popustljivih veza drvenih okvirnih konstrukcija

Esad Mešić

Ključne riječi

drvene okvirne konstrukcije, popustljive veze, modeliranje, nelinearna analiza, ograničena nelinearnost

Key words

wooden frame structure, yielding links, modeling, nonlinear analysis, limited nonlinearity

Mots clés

structures en bois, connexions fléchissantes, modélisation, analyse non-linéaire, non-linéarité limitée

Ключевые слова

деревянные рамные конструкции, податливые связи, моделирование, нелинейный анализ, ограниченная нелинейность

Schlüsselworte

Holzrahmenkonstruktionen, nachgiebige Verbindungen, Modellierung, unlineare Analyse, begrenzte Unlinearität

E. Mešić

Prethodno priopćenje

Modeliranje popustljivih veza drvenih okvirnih konstrukcija

U radu je prikazan način modeliranja popustljivih veza za nelinearnu analizu drvenih okvirnih konstrukcija. Predloženi numerički model baziran je na konceptu ograničene nelinearnosti, s mogućnošću lakog prikazivanja rezultata ponašanja veza koje treba odrediti ispitivanjima. Ističe se da primjena ovakvog numeričkog modela popustljivih veza uz povezivanje sa rezultatima ispitivanja, daje mogućnost cjelovite analize drvene konstrukcije kao kombinacije analize konstrukcije i veza.

E. Mešić

Preliminary note

Modeling yielding links of wooden frame structures

The methodology of modeling yielding links for the nonlinear analysis of wooden frame structures is presented. The numerical model proposed in the paper is based on the concept of limited nonlinearity, and is characterized by easy presentation of link behavior results to be determined by testing. It is emphasized that the use of this numerical model of yielding links, combined with test results, enables an overall analysis of wooden structures, by combining the analysis of the structure with that of the links.

E. Mešić

Note préliminaire

Modélisation des connexions fléchissantes des structures en bois

La méthodologie de modélisation des connexions fléchissantes pour l'analyse non-linéaire des structures en bois est présentée. Le model numérique proposé dans l'ouvrage est basé sur le concept de la non-linéarité limitée, et est caractérisé par la présentation facile des résultats de comportement des connexions qui sont à déterminer par les essais. Il est souligné que l'usage de ce model numérique des connexions fléchissantes, en combinaison avec les résultats d'essais, permet une analyse globale des structures en bois, en reliant l'analyse de la structure à celle des connexions.

Э. Мешич

Предварительное сообщение

Моделирование податливых связей деревянных рамных конструкций

В работе, описан способ моделирования податливых связей для нелинейного анализа деревянных рамных конструкций. Предложенная числовая модель базирована на концепте ограниченной нелинейности, с возможностью лёгкого представления результатов поведения связей, которые необходимо определить испытаниями. Подчёркивается, что применение такой числовой модели податливых связей, наряду с результатами испытаний даёт возможность целостного анализа деревянной конструкции как комбинации анализа конструкции и связей.

E. Mešić

Vorherige Mitteilung

Modellierung nachgiebiger Verbindungen in Holzrahmenkonstruktionen

Im Artikel ist die Modellierungsweise nachgiebiger Verbindungen für die unlineare Analyse von Holzrahmenkonstruktionen dargestellt. Das vorgeschlagene numerische Modell beruht auf dem Konzept der begrenzten Unlinearität, mit der Möglichkeit eines leichten Darstellens der Ergebnisse des Verhaltens der Verbindungen das durch die Untersuchungen bestimmt werden soll. Es wird hervorgehoben dass die Anwendung eines solchen Modells der nachgiebigen Verbindungen, verbunden mit den Ergebnissen der Untersuchungen, eine vollständige Analyse der Holzkonstruktion ermöglicht, als Kombination der Analysen der Konstruktion und der Verbindungen.

Autor: Doc. dr. sc. **Esad Mešić**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet u Sarajevu, Patriotske lige 30, BiH

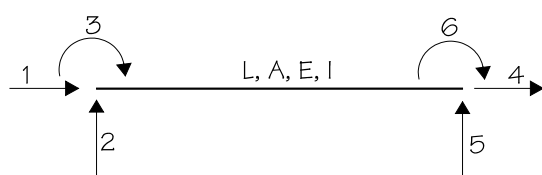
1 Analiza problema

Nosivost kao i upotrebljivost drvenih konstrukcija najvećim dijelom zavisi od oblikovanja i proračuna veza između konstrukcijskih elemenata. Procedura proračuna neke drvene konstrukcije zapravo je kombinacija njezine globalne analize i lokalne analize veza. Ključni problem jest u ponašanju veza s mehaničkim spajalima (čavlima, vijcima, moždanicima i dr.), pri prenošenju opterećenja, kao mjesta zajedničkog djelovanja dvaju najčešće različitih materijala (drva kao osnovnog materijala i metala kao spajala). To se ponašanje ogleda u kapacitetu prenošenja opterećenja i sposobnosti deformacije pod velikim opterećenjem, što je suštinska osobina čvorova drvenih konstrukcija koji se rabe u seizmičkim područjima.

Tradicionalni pristup u analizi drvenih a i ostalih konstrukcija podrazumijeva idealizaciju u ponašanju veza kao krutih ili zglobnih. To su međutim pojednostavljeni granični slučajevi stvarnog ponašanja veza. Da bi se dobila realnija slika statičkog i deformacijskog stanja u drvenoj konstrukciji, potrebno je uključiti i efekte deformabilnosti veza. Kao mjera deformabilnosti definira se krutost veza. Ona se uzima u proračun kao konstantna, kao linearno ili nelinearno zavisna od veličine deformacije, s vremenskim efektima ili bez njih, sve zavisno od toga oslanjamo li se na propise ili rezultate eksperimenata.

2 Matrična modifikacija krutih veza na krajevima štapa u popustljive veze

Za prizmatičan štap u ravnini dužine L, s krutim vezama na krajevima i s generaliziranim pomacima (stupnjevi slobode) 1, 2, 3, 4, 5, i 6 prema slici 1., matrica krutosti [K] ima standardni oblik:



Slika 1. Generalizirani pomaci štapa u ravnini

$$[K] = \frac{EI}{L} \begin{bmatrix} A/I & 0 & 0 & -A/I & 0 & 0 \\ 0 & 12/L^2 & 6/L & 0 & -12/L^2 & 6/L \\ 0 & 6/L & 4 & 0 & -6/L & 2 \\ -A/I & 0 & 0 & A/I & 0 & 0 \\ 0 & -12/L^2 & -6/L & 0 & 12/L^2 & -6/L \\ 0 & 6/L & 2 & 0 & -6/L & 4 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Međutim, ako postoji pomičnost u vezama na krajevima štapa, matrica krutosti (1) može biti modificirana na račun efekata popuštanja veza u smjerovima odgovarajućih stupnjeva slobode. Modificirana matrica krutosti

određena je direktnim postupkom, na osnovi jasnoga geometrijsko-statičkog značenja njezinih elemenata [5]. Pri formiranju matrice krutosti štapa problem savijanja može se promatrati nezavisno od aksijalnog naprezanja, tako da se matrice poprečne i aksijalne krutosti mogu formirati odvojeno a zatim superponirati.

2.1 Matrica poprečne krutosti

Pri obostrano nepotpuno ukliještenom štapu s odgovarajućom rotacijskom krutosti veza na krajevima S_{rj} i S_{rk} (slika 2.) za određivanje matrice krutosti primijenjen je princip zadavanja jediničnih generaliziranih pomaka (1, 2, 3 i 4) uz mogućnost relaksacije u smjeru rotacija (2 i 4). Na taj je način dobivena jednačba (2),



Slika 2. Obostrano nepotpuno ukliješteni štap u ravnini (S_{rj} , S_{rk} - rotacijske krutosti, $j = 2$ i $k = 4$)

$$[K^*] = [A]^{-1} [K]; \quad (2)$$

$$[A] = [I] + [K][S]; \quad [S] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_{r2}^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{r4}^{-1} \end{bmatrix}$$

ili u razvijenom obliku

$$[K^*] = \frac{EI}{L(1+\beta_3)} \begin{bmatrix} \frac{12+\beta_1+\beta_2}{L^2} & \frac{6+\beta_2}{L} & -\frac{12+\beta_1+\beta_2}{L^2} & \frac{6+\beta_1}{L} \\ \frac{6+\beta_2}{L} & 4+\beta_2 & -\frac{6+\beta_1}{L} & 2 \\ -\frac{12+\beta_1+\beta_2}{L^2} & -\frac{6+\beta_2}{L} & \frac{12+\beta_1+\beta_2}{L^2} & -\frac{6+\beta_1}{L} \\ \frac{6+\beta_1}{L} & 2 & -\frac{6+\beta_1}{L} & 4+\beta_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

gdje je:

$$\beta_1 = \frac{12EI}{S_{rj}L}; \quad \beta_2 = \frac{12EI}{S_{rk}L};$$

$$\beta_3 = \frac{4EI}{S_{rj}L} + \frac{4EI}{S_{rk}L} + \frac{12}{S_{rj}S_{rk}} \left(\frac{EI}{L} \right)^2 = \frac{\beta_1}{3} + \frac{\beta_2}{3} + \frac{\beta_1\beta_2}{12} \quad (4)$$

Oblik matrice (3) je "univerzalan", jer se jednako može primijeniti i na obostrano ukliješteno i na štapove sa zglobovima na jednom ili na oba kraja, tako da vrijednost odgovarajuće krutosti S_{ri} ($i = j, k$) teži beskonačnosti (totalno ukliještenje) odnosno nuli (zglobna veza).

2.2 Matrica aksijalne krutosti

Pri aksijalno napregnutim štapovima, sa popustljivim vezama na krajevima, karakteristična je aksijalna krutost. Ona se može izraziti s pomoću reducirane površine presjeka A^* , a u modelu je predstavljena elastičnim oprugama aksijalne krutosti S_{ai} ($i = 1,2$), (slika 3.).



Slika 3. Model aksijalne krutosti

Reducirana površina presjeka A^* dana je izrazom

$$A^* = \frac{A}{1 + \frac{EA}{L} \left(\frac{1}{S_{a1}} + \frac{1}{S_{a2}} \right)} \quad (5)$$

Modificirana matrica aksijalne krutosti ima sljedeći oblik:

$$[K^*] = \frac{EA^*}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Za redosljed stupnjeva slobode kao na slici 1., superpozicijom matrica (3) i (6) dobiva se matrica krutosti štapa s popustljivim vezama na krajevima u smjerovima aksijalnih i rotacijskih stupnjeva slobode:

$$[K^*] = \frac{EI}{L(1 + \beta_3)} \times \begin{bmatrix} \alpha_0 & 0 & 0 & -\alpha_0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12 + \beta_1 + \beta_2}{L^2} & \frac{6 + \beta_2}{L} & 0 & -\frac{12 + \beta_1 + \beta_2}{L^2} & \frac{6 + \beta_1}{L} \\ 0 & \frac{6 + \beta_2}{L} & 4 + \beta_2 & 0 & -\frac{6 + \beta_2}{L} & 2 \\ -\alpha_0 & 0 & 0 & \alpha_0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12 + \beta_1 + \beta_2}{L^2} & -\frac{6 + \beta_2}{L} & 0 & \frac{12 + \beta_1 + \beta_2}{L^2} & -\frac{6 + \beta_1}{L} \\ 0 & \frac{6 + \beta_1}{L} & 2 & 0 & -\frac{6 + \beta_1}{L} & 4 + \beta_1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

gdje je: $\alpha_0 = \frac{A^*(1 + \beta_3)}{L}$ (8)

Modificirana matrica krutosti za problem stabilnosti i geometrijskih nelinearnosti [5] dana je na sljedeći način:



Slika 4. Obostrano nepotpuno uklješten pritisnuti štup u ravni

$$[K^*] = [A']^{-1} [K'] \quad (9)$$

gdje je:

$[K'^*]$ – modificirana matrica krutosti prema teoriji drugog reda

$[A']^{-1}$ – matrica modifikacije

$[K']$ – originalna matrica krutosti prema teoriji drugog reda.

Poslije primjene relacije (9), dobiva se

$$[K'^*] = \frac{EI}{L(1 + \beta_3)} \times$$

$$\begin{bmatrix} \frac{2c' - \omega^2 + \beta_1 + \beta_2 - \gamma_1 - \gamma_2 - \gamma_3}{L^2} & \frac{c' + \beta_2}{L} & -\frac{2c' - \omega^2 + \beta_1 + \beta_2 - \gamma_1 - \gamma_2 - \gamma_3}{L^2} & \frac{c' + \beta_1}{L} \\ \frac{c' + \beta_2}{L} & a' + \beta_2 & -\frac{c' + \beta_2}{L} & b' \\ -\frac{2c' - \omega^2 + \beta_1 + \beta_2 - \gamma_1 - \gamma_2 - \gamma_3}{L^2} & \frac{c' + \beta_2}{L} & \frac{2c' - \omega^2 + \beta_1 + \beta_2 - \gamma_1 - \gamma_2 - \gamma_3}{L^2} & -\frac{c' + \beta_2}{L} \\ \frac{c' + \beta_1}{L} & b' & -\frac{c' + \beta_2}{L} & a' + \beta_1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

gdje su:

$$\beta_1 = \frac{EI}{LS_{r2}} (a'^2 - b'^2); \quad \beta_2 = \frac{EI}{LS_{r4}} (a'^2 - b'^2);$$

$$\beta_3 = \frac{1}{\omega^2} (\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3);$$

$$\gamma_1 = \frac{\omega^2 a' EI}{LS_{r2}}; \quad \gamma_2 = \frac{\omega^2 a' EI}{LS_{r4}};$$

$$\gamma_3 = \frac{\omega^2}{S_{r2} S_{r4}} \left(\frac{EI}{L} \right) (a'^2 - b'^2);$$

$$a' = \frac{\omega \sin \omega - \omega^2 \cos \omega}{2(1 - \cos \omega) - \omega \sin \omega};$$

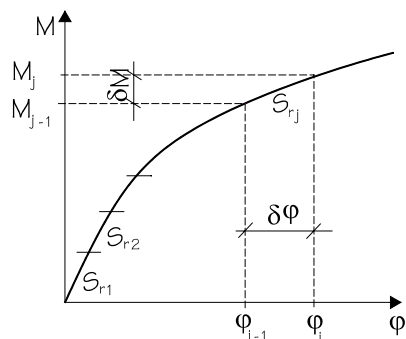
$$b' = \frac{\omega^2 - \omega \sin \omega}{2(1 - \cos \omega) - \omega \sin \omega}; \quad c' = a' + b';$$

$$\omega = L \sqrt{\frac{N}{EI}} \quad (11)$$

2.3 Udio veza u nelinearnoj analizi

Nelinearno ponašanje okvira sa popustljivim vazama u čvorovima rezultat je nelinearne prirode veza i sekundarnih efekata pri velikim pomacima. Ako se nelinearna analiza vrši u području malih pomaka, onda je ona uglavnom zasnovana na nelinearnom ponašanju veza. U tom slučaju primjena matrice krutosti (7), obuhvaća nelinearnosti od veza, jer sadrži članove s nelinearnim koeficijentima (S_r i S_a) koji zavise od njezine krutosti. Na taj bi

se način moglo govoriti o tzv. *ograničenoj nelinearnosti*. Za potrebe takve analize, uz upotrebu inkrementalnog postupka, nužno je poznavanje zavisnosti moment-rotacija (M-φ) veze (slika 5.).



Slika 5. Proizvoljna zavisnost moment-rotacija (M-φ) popustljive veze

$$\delta M = S_{rj} \cdot \delta \varphi,$$

$$S_{rj} = (M_j - M_{j-1}) / (\varphi_j - \varphi_{j-1}) \quad (12)$$

Osnova inkrementalnog postupka sastoji se u podjeli ukupnog opterećenja na niz parcijalnih opterećenja ili inkremenata, koji u općem slučaju mogu biti različiti. U okviru svakog inkrementa vrši se linearna analiza problema s popravljenom matricom krutosti. Na taj se način rješenje promatranog problema dobiva kao zbroj linearnih rješenja. Da bi se postigla brža konvergencija rješenja, ovaj se postupak može kombinirati s iterativnim postupkom za pojedine inkremente opterećenja (Newton-Raphsonov modificirani postupak i dr.).

Ako pri analizi drvene konstrukcije, osim nelinearnosti veza, treba obuhvatiti i geometrijsku nelinearnost, tada se globalna matrica krutosti dobiva kao algebarska kombinacija jednačbi (10) za pojedine štapove. To se ponajprije odnosi na konstrukcije s velikim pomacima koji potječu od vitkosti pojedinih štapova i zbog popustljivosti veza, uz značajnije normalne sile. Što se daljeg postupka analize tiče, on se sprovodi kao i u prethodnom slučaju, inkrementalno, za poznati odnos moment-rotacija veze.

3 Modeliranje veze s pomoću nelinearnih «Link» elemenata

Da bi se izbjeglo modeliranje nelinearnog ponašanja veze jednom oprugom (u pravcu određenoga generaliziranog pomaka), s relativno složenom karakteristikom sila-deformacija koju bi za numeričke potrebe bilo teže opisati, ovdje se predlaže modeliranje veze s pomoću četiri nelinearna elementa s jednostavnim odnosima sila-deformacija i mogućnošću lake reprodukcije stvarnog ponašanja veze.

Ovaj se pristup bazira na konceptu *ograničene nelinearnosti* u očekivanim lokalitetima konstrukcije [2] i [9], koji se uspješno može primijeniti pri općoj analizi drvenih konstrukcija s obzirom da se linearnost odnosi na štapove kao kruće elemente, dok se očekivana nelinearnost odnosi na veze s mehaničkim spajalima.

Za modeliranje ograničene nelinearnosti razvijeno je nekoliko tipova nelinearnih konačnih elemenata nazvanih Link elementi [7] i sastavni su dio računalnoga programa SAP 2000n. U osnovi radi se o nelinearnim elementima sa šest generaliziranih pomaka, odnosno šest nezavisnih opruga (šest nezavisnih unutrašnjih deformacija) koje sa svojim nultim rasponom mogu biti locirane između dvaju bliskih čvorova konstrukcije ili između jednog čvora i podloge.

3.1 Link elementi

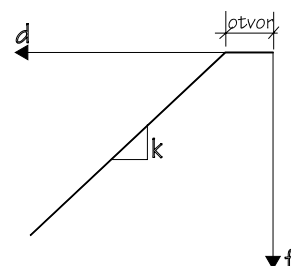
U ovom istraživanju upotrijebljena su tri tipa *Link elemenata*: Gap, Hook i Plastic 1.

3.1.1 Element tipa Gap

Za deformaciju u pravcu svakog stupnja slobode mogu se specificirati nezavisne osobine, ali samo na pritisak. Nelinearan odnos sila-deformacija (f-d), (slika 6.), dan je relacijom:

$$f = \begin{cases} k(d + \text{otvor}) & \text{ako je } d + \text{otvor} < 0 \\ 0 & \text{u svakom drugom slučaju} \end{cases} \quad (13)$$

k - konstanta opruge *otvor* - početni Gap otvor koji mora biti nula ili pozitivan.



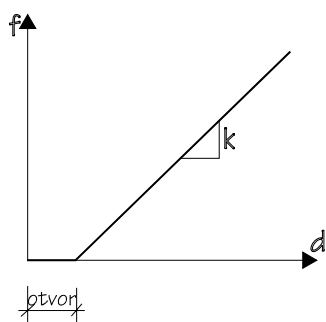
Slika 6. Definicija parametara elementa Gap

3.1.2 Element tipa Hook

Za deformaciju u pravcu svakog stupnja slobode mogu se specificirati nezavisne osobine, ali samo na zatezanje. Nelinearan odnos sila-deformacija (f-d), (slika 7.), dan je relacijom:

$$f = \begin{cases} k(d - \text{otvor}) & \text{ako je } d - \text{otvor} > 0 \\ 0 & \text{u svakom drugom slučaju} \end{cases} \quad (14)$$

k - konstanta opruge
otvor - početni Hook otvor koji mora biti nula ili pozitivan.



Slika 7. Definicija parametara elementa Hook

3.1.3 Element tipa *Plastic 1*

Za deformaciju u pravcu svakog stupnja slobode mogu se specificirati nezavisne jednoosno plastične osobine. Nelinearan odnos sila-deformacija ($f-d$), (slika 8.), dan je relacijom:

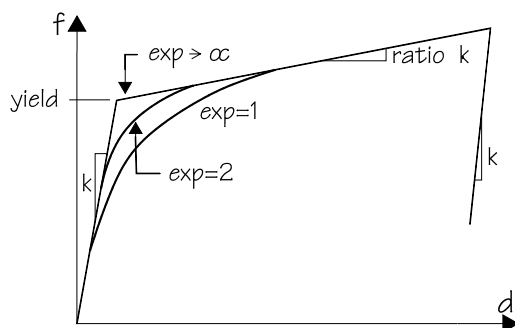
$$f = \text{ratio} \cdot k \cdot d + (1 - \text{ratio}) \cdot \text{yield} \cdot z \quad (15)$$

k – konstanta opruge

yield – sila popuštanja

ratio – dio krutosti nakon popuštanja

z – unutrašnja histerezisna na varijablu



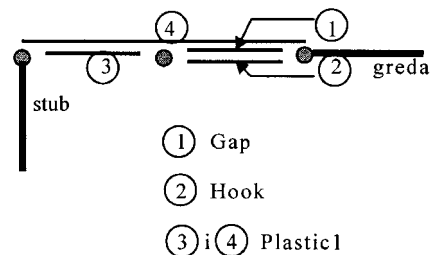
Slika 8. Definicija parametara elementa Plastic 1

3.2 Modeliranje veze s pomoću Link elemenata

Da bi se izrazilo što realnije ponašanje veze sa mehaničkim spajalima (popustljivim vezama) ovdje se predlaže numerički model veze koji se sastoji od četiri Link elementa smještena između tri čvora (slika 9.), pri čemu su dva krajnja čvora čvorovi stvarnih elemenata konstrukcije (stupa i prečke), dok je srednji čvor pomoćni (fiktivni) i služi samo zato da se Link elementi postave na način koji omogućava dobro modeliranje deformabilnih karakteristika veze [6].

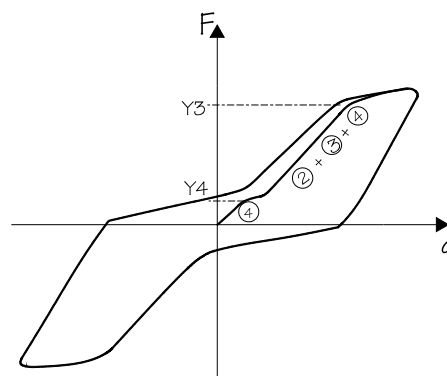
Na ovaj način jednu oprugu sa svojom sila-deformacija karakteristikom zamjenjuju četiri jednostavna Link ele-

menta koji, za određeni stupanj slobode, daju isti odnos sila-deformacija.



Slika 9. Model čvora drvenog okvira u ravnini (numerički model popustljive veze)

Za ovako modeliranu vezu na slici 10. prikazan je dijagram odnosa sila-deformacija pri cikličnom opterećenju.



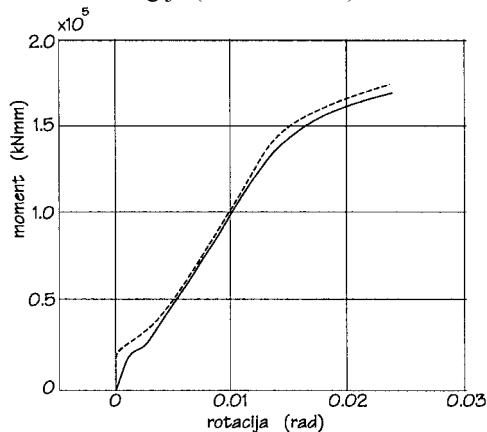
Slika 10. Histerezno ponašanje predloženoga numeričkog modela veze

Prema slici 10., prenošenje opterećenja kroz vezu počinje angažiranjem elementa 4 čija je inicijalna krutost (za statičko opterećenje) jednaka početnoj krutosti veze (uglavnom uzrokovane trenjem). Kada nivo opterećenja nadvlada trenje (točka Y4), element 4 počinje teći sve do zatvaranja otvora Hooka, odnosno do nalijeganja spajala i drveta. Nakon toga angažira se ekvivalentna krutost elemenata 4, 3 i 2. Početak plastifikacije veze poklapa se s početkom tečenja elementa 3 (točka Y3). Sasvim analogno ponašanje modela očituje se pri promjeni smjera opterećenja, s jedinom razlikom da se umjesto Hooka uključuje Gap. Iz slike je očigledno da se dijagram sila – deformacija može lako prilagođavati, za različite veze i opterećenje, jednostavnim mijenjanjem odgovarajućih parametara Link elemenata.

Takvim se modelom preko određenih stupnjeva slobode Link elementa stječe mogućnost istodobnoga tretiranja deformacija veze u raznim pravcima (rotacija i aksijalna deformacija), i njihova ukupnog utjecaja na ponašanje drvene konstrukcije kao cjeline. Dakle, uz unaprijed poznatu krivulju sila-deformacija, modeliranje veza postaje jednostavno i pruža mogućnost detaljne analize konstrukcije s vremenski zavisnim opterećenjem.

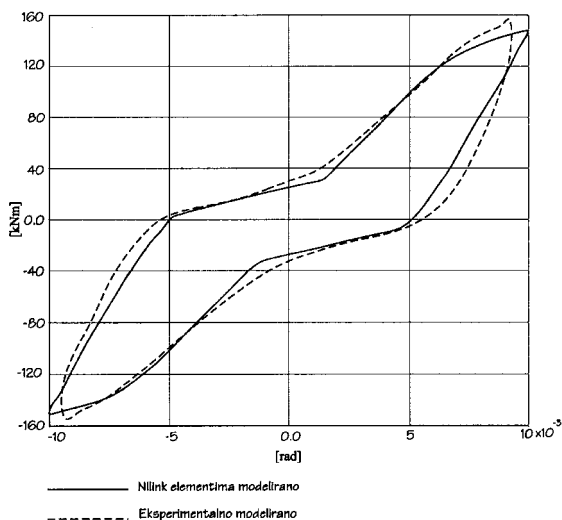
4 Usporedni prikaz eksperimentalnog i Link elementima modeliranog nelinearnog ponašanja popustljivih veza

Za potrebe modeliranja popustljivih veza autor se koristio mnogobrojnim empirijskim podacima koji definiraju odnos veze sila-deformacija. Ovdje je dan usporedni prikaz dijela rezultata eksperimenta profesora Ceccottija i grupe suradnika, koji su objavljeni na Sveučilištu u Firenci 1994 [1], s rezultatima dobivenim primjenom prethodne metodologije (slike 11. i 12.).



— Llink element. modelirano
 Eksperimentalno dobiveno [1]

Slika 11. Odnos moment-rotacija čvora okvira za monotono opterećenje

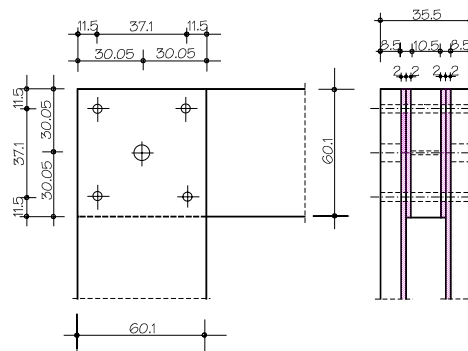


— Nlink elementima modelirano
 Eksperimentalno modelirano

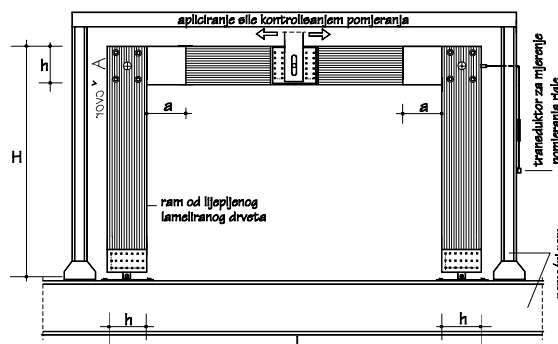
Slika 12. Histerezne petlje (moment – rotacija) čvora okvira za ciklično opterećenje

Ispitivanjima profesora Ceccottija ustanovljeno je ponašanje dvozglobnih okvira od lijepljenoga lamelniranog drva, u pravoj veličini, s vezama u čvorovima izvedenim cilindričnim metalnim moždanicima i ojačanim "šperpločama" (slika 13.). Ukupno je testirano 12 okvira u dvije

serije: (6 malih – S i 6 velikih – L). Na slici 14. prikazana je dispozicija jednog od ispitivanih okvira.



Slika 13. Čvor okvira



Slika 14. Dispozicija ispitivanja okvira

5 Zaključak

U radu je opisana metodologija modeliranja popustljivih veza uz ograničenu nelinearnu analizu drvenih okvirnih konstrukcija. Prethodno je potrebno pokusom ustanoviti deformacijske karakteristike veze.

Usvojeni numerički model popustljive veze baziran je na konceptu ograničene nelinearnosti s unaprijed očekivanim mjestima nelinearnog ponašanja (popustljive veze) okvira. Metodologija daje mogućnost vjerodostojne reprodukcije eksperimentalnih rezultata i u duhu je suvremenih proračunskih metoda za globalnu analizu konstrukcija. Primjenjiva je u nelinearnoj statičkoj i dinamičkoj analizi konstrukcija uz upotrebu komercijalnih računalnih programa kakav je npr. SAP2000n. Za zadani nivo opterećenja, jednim proračunskim prolazom, definirani numerički model popustljive veze daje njeno realno ponašanje. Međutim, u slučaju ponovnog opterećivanja istog ili većeg intenziteta (ciklično opterećenje) potrebno je reducirati parametre modela veze na račun pada njezine krutosti. Postupak se može ponavljati sve dok se ne uđe u područje velikih trajnih deformacija - "rasklimanost veze" (pod uvjetom da stabilnost konstrukcije nije narušena) za koju onda parametri modela veze ostaju fiksni i za ponovna niža opterećenja.

Osim na drvene konstrukcije, ovdje prikazani proračunski koncept može se primijeniti i na ostale (čelične ili

betonske montažne) konstrukcije, uz adekvatan odnos sila-deformacija popustljivih veza.

LITERATURA

- [1] Ceccotti, A.; Giordano, S.; Covan, C.; Lauriola, M.: Report, Part 3.2, *Portal Frames with Veneer Wood Reinforced Joints and Tube-type Fasteners tested by Ramp and Reversal Lateral Loading*, FOREST Project, Physical and Mechanical Properties of Densified Veneer Wood for Structural Application, Laboratorio Strutture, Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Firenze, 1994.
- [2] Clough, R. W. and Penzien, J.: *Dynamics of Structures*, 2nd edition, McGraw-Hill, New York, 1993.
- [3] Dunica, Š.; Kolundžija, B.: *Nelinearna analiza konstrukcija*, Građevinski fakultet u Beogradu, Naučna Knjiga, Beograd, 1986.
- [4] EUROCODE 5, Design of timber structures CEN TC 250/SC5, ENV 1995-1-1, 1993.
- [5] Mešić, E.: *Ponašanje krutih i polukrutih veza u čvorovima ramovskih sistema od lepljenog lameliranog drveta pri eksploatacionom i graničnom opterećenju*, Magistarski rad, Beograd, 1993.
- [6] Mešić, E.: *Efekte deformabilnih veza u ramovskim drvenim konstrukcijama pri prenošenju statičkih i dinamičkih uticaja*, Doktorska disertacija, Sarajevo, 2000.
- [7]. SAP2000, Manual, Analysis Reference, Vol. 1, Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA, 1997.
- [8]. CEN TC 124.117, Timber structures - Test methods - Cyclic testing of joints made with mechanical fasteners, CEN, Bruxelles, Belgium, 1994.
- [9]. Ibrahimbegović, A.: *Dynamic Analysis of Linear Structure-Foundation Systems with Local Nonlinearities*, Doctoral Dissertation, University of California at Berkeley, Berkeley, 1989.