

University
of Ljubljana

Faculty
of Civil and Geodetic
Engineering

*Inštitut za konstrukcije,
potresno inženirstvo in
računalništvo*

Jamova 2, p.o.b. 3422
1115 Ljubljana, Slovenia
Tel. +386 1 47 68 592
Fax. +386 1 42 50 693
pfajfar@ikpir.fgg.uni-lj.si



Navodila za uporabo spletne verzije programa NEAVEK

**Uporabniški priročnik
Verzija 0.1**

Iztok Peruš, Vojko Kilar in Peter Fajfar

Ljubljana, maj 2016

VSEBINA

POVZETEK

1. UVOD

2. TEORETIČNE OSNOVE

2.1 Splošno

2.2 Enačbe za izračun faktorja dogodka ob pojavih plastifikacije makroelementov

2.2.1 Okvir

2.2.2 Stena

3. UPORABA PROGRAMA

3.1 Priprava podatkov

3.1.1 Vhodna datoteka za program EAVEK

3.1.2 Vhodna datoteka za program NEAVEK

3.2 Rezultati in interpretacija rezultatov

3.2.1 Izhodna datoteka

3.2.2 Interpretacija rezultatov

4. TESTNI PRIMERI

3.1 Primer 1 – dvoetažna stenasta konstrukcija s tremi različnimi stenami

3.2 Primer 2 – dvoetažna stenasta konstrukcija s štirimi stenami enakih prerezov, vendar različnih nosilnosti

3.3 Primer 3 – šestetažni dvoladijski okvir

3.4 Primer 4 – sedemetažna stenasto-skeletna konstrukcija (TSUKUBA)

LITERATURA

1. UVOD

Spletna verzija programa NEAVEK predstavlja fortransko verzijo programa NEAVEK, ki ga je v svoji doktorski disertaciji razvil Vojko Kilar pod mentorstvom prof. Petra Fajfarja (Kilar, 1995; Kilar & Fajfar, 1995). Omogoča poenostavljeno nelinearno statično potisno (angl. push-over) analizo konstrukcij stavb pri horizontalni obtežbi. Ker je metoda sorazmerno enostavna, je namen ponovne izdelave programa, ki ni vezan na predpripravo podatkov s programom EAMODEL, predvsem uporaba v projektantski praksi. Uporabo sicer relativno enostavnih nelinearnih metod, ki jih med drugim predpisuje tudi Evrokod 8, si v vsakdanji projektantski praksi namreč težko predstavljamo brez uporabe enostavnih in učinkovitih računalniških orodij. Poleg zelo enostavne in pregledne priprave podatkov je za vsakdanjo prakso pomembna predvsem enostavna in hitra kontrola vhodnih podatkov in dobljenih rezultatov. Zelo sofisticirana računalniška orodja za nelinearno analizo na eni strani sicer omogočajo bolj natančen račun nelinearnega odziva konstrukcije, po drugi strani pa je določitev nelinearnih karakteristik nosilnih elementov in priprava vhodnih podatkov, njihova kontrola zaradi večje količine teh podatkov in nazadnje tudi kontrola dobljenih rezultatov zelo zahtevno in naporno delo. Tudi možnost napak je velika, vsekakor pa precej večja kot pri enostavnih modelih. Seveda pa lahko program NEAVEK uporabimo tudi za kontrolo rezultatov, dobljenih z bolj sofisticiranimi nelinearnimi modeli.

Program NEAVEK oz. vgrajena metoda v vsakem koraku nelinearne analize uporabi program EAVEK, ki uporablja pseudo-tridimenzionalni računalniški model. V verzijo programa **0.1** sta trenutno vgrajena le dva najpogostejša tipa nosilnih elementov – stena (tip CANTILEVER) in okvir (tip FRAME). Pri stenah je predpostavljena plastifikacija ob vpetju stene, ki je zajeta »točno« z vključitvijo elastične vpetosti ob nastopu plastifikacije. Pri okvirih so upoštevani različni plastični mehanizmi v okviru, od globalnega, ko pride do plastičnega mehanizma ob vpetju vseh stebrov v prvi etaži in vseh prečkah, do lokalnih, ko pride do delnega plastičnega mehanizma (v stebrih ob vpetju in poljubni etaži, v vmesnih etažah pa se plastificirajo tudi vse prečke). Čeprav pri okvirih to niso vsi možni plastični mehanizmi, se izkaže, da je končna nosilnost konstrukcije tudi ob upoštevanju naštetih mehanizmov zelo blizu »dejanski« nosilnosti, dobljeni z bolj sofisticiranimi nelinearnimi modeli. Največja pomanjkljivost pri uporabi elementa FRAME je nenatačnost pri določitvi pomikov po doseženem plastičnem mehanizmu, saj trenutno boljši model brez posega v originalni program EAVEK ne obstaja.

2. TEORETIČNE OSNOVE

2.1 Splošno

Razširitev pseudo-tridimenzionalnega modela v nelinearno območje predpostavlja odsekoma linearno obnašanje konstrukcije med posameznimi plastifikacijami makroelementov. V trenutni verziji programa sta v splošnem upoštevana le dva tipa običajnih makroelementov in sicer stena (CANTILEVER) in okvir (FRAME).

Za vsak osnovni tip makroelementa so predpostavljeni različni plastični mehanizmi. Pri običajni konzolni steni brez odprtin je predpostavljeno, da pride do plastifikacije elementa takrat, ko pride do nastopa upogibnega plastičnega členka ob vpetju stene ali v poljubni etaži. Pri pravilnih okvirih so upoštevani oz. kontrolirani različni plastični mehanizmi: (1) globalni porušni mehanizem po stebrih ob vpetju in vseh prečkah v vseh etažah, (2) po vseh stebrih v prvi etaži /t.i. mehka etaža/ in (3) delni porušni mehanizem do neke etaže, ki predstavlja porušni mehanizem po stebrih ob vpetju prve etaže in na vrhu neke etaže ter vseh prečkah v vseh etažah do te etaže.

Ker je predpostavljeno, da je obnašanje konstrukcije med posameznimi dogodki (plastifikacijami makroelementov) na grafu sila-pomik linearno, se togost vsakega makroelementa po nastopu plastifikacije ustrezno priredi:

- V primeru stene je plastifikacija stene ob vpetju zajeta »točno« z vključitvijo rotacijske elastične vpetosti ob upoštevanju utrditve stene.
- V okviru zmanjšamo togost plastificiranih stebrov in prečk tako, da predpostavljena utrditev predstavlja novo togost okvira.

Pri obeh tipih makroelementov je torej predpostavljen bilinearen odnos sila-pomik. Kot začetno togost makroelementov lahko upoštevamo dejansko elastično togost ali pa ekvivalentno togost (polovična vrednost vztrajnostnega momenta prereza pri upogibu in polovična vrednost strižnega prereza pri strigu), ki implicitno zajema vpliv razpokanosti prereza betonskih elementov konstrukcij v natezni coni.

V postopku približne nelinearne potisne analize v vsakem koraku izračunamo faktorje dogodkov (glej podpoglavje 2.2) za vse makroelemente v konstrukciji in izberemo najmanjšega. Plastificira se makroelement z najmanjšim faktorjem dogodka. Postopek se ponavlja tako dolgo (za že plastificirane makroelemente se faktor dogodka ne računa več), da se ali plastificirajo vsi elementi ali pa konstrukcija doseže predpisan neelastični pomik na vrhu.

2.2 Enačbe za izračun faktorja dogodka ob pojavih plastifikacije makroelementov

2.2.1 Okviri

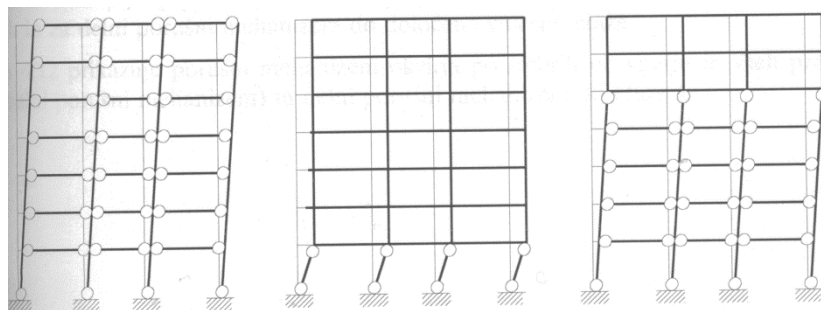
2.2.1.1 Teorija prvega reda (TPR) pri okvirih

Makroelement FRAME v programu EAVEK predstavlja pravilen ortogonalen okvir z enakim številom prečk in stebrov v vsaki etaži. Za račun togostne matrike se uporabljajo enačbe Sigalova. Predpostavljeno je [Kilar, 1995]: (1) Vsota togosti prečk ni bistveno manjša od vsote togosti stebrov, (2) Momentna ničelna točka se nahaja približno na redini razpona prečk in stebrov; le pri stebrih v prvi etaži se upošteva momentni členek na mestu, kjer se sicer pojavi pri enoetažnem okviru, (3) Zanemarjene so osne in strižne deformacije prečk in stebrov in (4) Zanemarena je nosilnost tistega dela okvira, ki leži nad koto delovanja zunanje obtežbe. Tako enostaven nelinearni model, ki se uporablja v programu

NEAVEK, v splošnem ni namenjen analizi samostojnih okvirov ali konstrukcij, sestavljenih iz samih okvirov. Seveda se lahko uporablja za analizo, potrebno pa se je zavedati, da daje takšna analiza le grobo oceno nelinearnega obnašanja čistih okvirnih konstrukcij.

Pri okvirih se preverjajo trije različni tipi plastičnih mehanizmov:

- (1) globalni mehanizem po stebrih v pritliču ob vpetju in vseh prečkah v vseh etažah,
- (2) mehka etaža, kjer se pojavijo plastični členki v vseh stebrih v prvi etaži,
- (3) delni plastični mehanizem do posamezne vmesne etaže; delni plastični mehanizem do prve etaže je enak mehanizmu mehke etaže pod točko (2),



globalni mehanizem (1) mehka etaža (2) delni plastični mehanizem (3)

Slika 2.2.1: Preverjani plastični mehanizmi pravilnih ortogonalnih okvirov.

Osnovna predpostavka pri računu je, da se vsak okvir obnaša bilinearno: linearno od začetka do prvega pojava enega od plastičnih mehanizmov, opisanih zgoraj, nato pa spet linearno z zmanjšano togostjo okvira. Togost se zmanjša samo tistim etažam, ki so se plastificirale.

Vsak okvir je v višinah etažnih plošč obremenjen s koncentriranimi horizontalnimi silami, ki so odvisne od njegove togosti (in tlorsnega položaja v primeru prostorske konstrukcije). Te sile so v vsakem koraku (med enim in drugim plastičnim mehanizmom celotne konstrukcije) sestavljene iz dveh deležev. V i -ti etaži en delež ustreza celotni obtežbi v tej etaži ($P_{s,i}$), ki odpade na okvir do tega trenutka, drugi delež pa prirastku obtežbe (ΔP_i) na okvir zaradi izbranega prirastka zunanje obtežbe konstrukcije. Pri tem za j -ti okvir (indeks je zaradi poenostavitve izpuščen iz zapisa) velja enaka enačba kot za steno:

$$Q_s = \sum_{i=1}^N P_{s,i} \quad \text{in} \quad \Delta Q = \sum_{i=1}^N \Delta P_i$$

N je število etaž okvira, Q_s skupna prečna sila okvira ob vpetju zaradi celotne zunanje obtežbe konstrukcije in ΔQ skupna prečna sila okvira ob vpetju zaradi prirastka zunanje obtežbe konstrukcije.

Dodatno velja tudi:

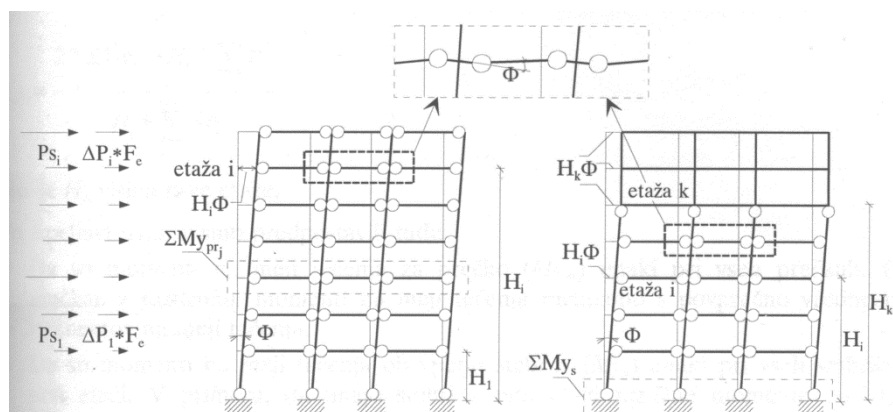
$$Q_{tot} = \sum_{j=1}^M Q_{s,j} \quad \text{in} \quad \Delta Q_{tot} = \sum_{j=1}^M \Delta Q_j$$

M je število vseh makroelementov (sten in okvirov), indeks j označuje makroelement, Q_{tot} skupna prečna sila konstrukcije ob vpetju zaradi celotne zunanje obtežbe konstrukcije in ΔQ_{tot} skupna prečna sila konstrukcije ob vpetju zaradi prirastka zunanje obtežbe konstrukcije.

Obtežba ob nastopu plastičnega mehanizma v okviru se določi s pomočjo faktorja dogodka F_e . Predstavlja faktor, s katerim se mora pomnožiti prirastek zunanje obtežbe, tako, da bi ob celotni obtežbi na okvir do obravnavanega dogodka prišlo do nastopa plastičnega

mehanizma v tem okviru. Pri tem se faktorji dogodka določijo s pomočjo kinematičnega teorema in s pomočjo izreka o virtualnem delu.

Velja omeniti, da ima pri določanju merodajnega plastičnega mehanizma pomemben vpliv razporeditev horizontalne obtežbe po višini makroelementa. Ta se pri dejanski potresni obtežbi s časom spreminja in zato natančna določitev ni ne nujna in ne smiselna. V praksi se namreč izkaže, da je upoštevanje najbolj tipičnih predpostavljenih plastičnih mehanizmov, glede na vse predpostavke v potresnem inženirstvu, dovolj natančno za potresno-varno projektiranje stavb.



Slika 2.2.2: Računska shema za določitev faktorja dogodka pri različnih plastičnih mehanizmi. Prikazana je obtežba in kinematične verige pri obravnavanih plastičnih mehanizmi.

Če z $\Sigma My_{s,i}$ označimo vsoto momentov stebrov na meji tečenja za prereze na enem koncu v i -ti etaži (Predpostavka je, da so momenti na meji tečenja zgoraj enaki momentom na meji tečenja spodaj!), z $\Sigma My_{p,i}$ vsoto momentov na meji tečenja za oba konca prečk v i -ti etaži in s Φ rotacijo okvira, lahko ob vpeljavi virtualnih zasukov $\delta\Phi$ po izenačenju virtualnega dela zunanjih sil in virtualnega dela notranjih sil določimo faktorje dogodkov.

Za nastop **globalnega plastičnega mehanizma** (1) velja:

$$\sum_{i=1}^N (P_{s,i} \cdot H_i + \Delta P_i \cdot H_i \cdot F_e) \cdot \delta\Phi = \sum My_{s,1} \cdot \delta\Phi + \sum_{i=1}^N \sum My_{p,i} \cdot \delta\Phi$$

Faktor dogodka pri tem je:

$$F_e = \frac{\sum My_{s,1} + \sum_{i=1}^N \sum My_{p,i} - \sum_{i=1}^N P_{s,i} \cdot H_i}{\sum_{i=1}^N \Delta P_i \cdot H_i}$$

Za nastop **delnega plastičnega mehanizma** (3) velja:

$$\sum_{i=1}^k (Ps_i \cdot H_i + \Delta P_i \cdot H_i \cdot F_e) \cdot \delta\Phi + H_k \cdot \sum_{i=k+1}^N (Ps_i + \Delta P_i \cdot F_e) \cdot \delta\Phi =$$

$$\left(\sum My_{s,1} + \sum My_{s,k-1} \right) \cdot \delta\Phi + \sum_{i=1}^{k-1} \sum My_{p,i} \cdot \delta\Phi$$

Faktor dogodka v primeru delnega porušnega mehanizma je:

$$F_e = \frac{\sum My_{s,1} + \sum My_{s,k-1} + \sum_{i=1}^{k-1} \sum My_{p,i} - \sum_{i=1}^k Ps_i \cdot H_i - H_k \cdot \sum_{i=k+1}^N Ps_i}{\sum_{i=1}^k \Delta P_i \cdot H_i + H_k \cdot \sum_{i=k+1}^N \Delta P_i}$$

V primeru, ko je $k=1$, delni plastični mehanizem preide v plastični mehanizem, ki odgovarja mehki etaži. Faktor dogodka v primeru **mehke etaže** (2) znaša:

$$F_e = \frac{2 \cdot \sum My_{s,1} - H_1 \cdot \sum_{i=1}^N Ps_i}{H_1 \cdot \sum_{i=1}^N \Delta P_i}$$

V izpeljanih enačbah je predpostavljeno, da so momenti na meji elastičnosti stebrov v vsaki etaži enaki. Enako velja za prečke. Če so različni, računamo s povprečnimi vrednosti (ker podajamo vsote momentov, se to pri podatkih ne vidi), napaka pa je toliko večja, kolikor bolj so si momenti na meji elastičnosti različni.

Upošteva se minimalni faktor dogodka izmed vseh možnih.

2.2.1.2 Teorija drugega reda (TDR) pri okvirih – upoštevanje $P-\Delta$ efekta

Bo dopolnjeno!

2.2.2 Stene

2.2.2.1 Teorija prvega reda (TPR) pri stenah

Pri pravilno konstruiranih in dimenzioniranih stenah v visokogradnji (ustrezno razmerje višina/širina mora biti večje ali enako dva) se ob naraščanju horizontalne obtežbe plastifikacija stene pojavi kot plastični členek ob vpetju. Če so stene zelo nizke, je praviloma merodajen strižni mehanizem, ki bi ga bilo potrebno obravnati drugače. V trenutni verziji programa je zato upoštevan le nastop upogibnega plastičnega mehanizma.

Vsaka stena je v višinah etažnih plošč obremenjena s koncentriranimi horizontalnimi silami, ki so odvisne od njene togosti (in tlorisnega položaja v primeru prostorske konstrukcije). Te sile so v vsakem koraku (med enim in drugim plastičnim mehanizmom celotne konstrukcije) sestavljene iz dveh deležev. V i -ti etaži prvi delež ustreza celotni obtežbi v tej etaži (Ps_i), ki odpade na steno do tega trenutka, drugi delež pa prirastku obtežbe (ΔP_i) na steno zaradi izbranega prirastka zunanje obtežbe konstrukcije. Pri tem za j -to steno velja (indeks je zaradi poenostavitve izpuščen iz zapisa):

$$Q_s = \sum_{i=1}^N Ps_i \text{ in } \Delta Q = \sum_{i=1}^N \Delta P_i$$

N je število etaž stene, Q_s skupna prečna sila ob vpetju stene zaradi celotne zunanje obtežbe konstrukcije in ΔQ skupna prečna sila ob vpetju stene zaradi prirastka zunanje obtežbe konstrukcije.

Dodatno velja tudi:

$$Q_{tot} = \sum_{j=1}^M Q_{s,j} \text{ in } \Delta Q_{tot} = \sum_{j=1}^M \Delta Q_j$$

M je število vseh makroelementov (sten in okvirov), indeks j označuje makroelement, Q_{tot} skupna prečna sila konstrukcije ob vpetju zaradi celotne zunanje obtežbe konstrukcije in ΔQ_{tot} skupna prečna sila konstrukcije ob vpetju zaradi prirastka zunanje obtežbe konstrukcije.

Upogibni moment ob vpetju stene zaradi obtežbe na steno na začetku koraka določimo z enačbo:

$$M_s = \sum_{i=1}^N Ps_i \cdot H_i$$

pri čemer je H_i višina od vpetja do kote obravnavane etaže i . Prirastek momenta zaradi prirastka zunanje obtežbe konstrukcije v obravnavanem koraku določimo z enačbo:

$$\Delta M = \sum_{i=1}^N \Delta P_i \cdot H_i$$

Plastični členek ob vpetju, ki predstavlja plastični mehanizem stene, nastopi, ko je celotni upogibni moment ob vpetju enak momentu na meji tečenja natezne armature M_y . Da najdemo obtežbo, ki bo ustrezala temu dogodku, si pomagamo s faktorjem dogodka F_e . Ta predstavlja faktor, s katerim moramo pomnožiti enotin prirastek zunanje obtežbe, da bo celotni upogibni moment ob vpetju stene enak momentu na meji tečenja M_y . Zaradi predpostavljenega linearne obnašanja stene znotraj obravnavanega koraka, lahko vse

količine (sile, pomike) enostavno množimo s faktorjem dogodka, da dobimo ustrezne količine ob koncu obravnavanega koraka, ki ustreza plastičnemu mehanizmu stene.

Glede na zgornji zapis lahko zapišemo enačbo ravnotežja ob nastopu plastičnega členka ob vpetju stene:

$$M_s + \Delta M \cdot F_e = M_y$$

Iz enačbe se faktor dogodka izrazi kot:

$$F_e = \frac{M_y - M_s}{\Delta M}$$

Ob nastopu plastičnega členka ob vpetju se nosilnost stene sicer močno zmanjša, vendar še vedno sodeluje pri nosilnosti celotne konstrukcije. V ta namen na mestu vpetja dodamo upogibno vzmet, s čimer podajnostni matriki tega vpetega elementa prištejemo podajnostno matriko togega elastično vpetega elementa. Koeficient c_3 , ki se v program EAVEK avtomatično doda ob nastopu plastifikacije stene, se izračuna z izrazom [Kilar, 1995]:

$$c_3 = \frac{H_{eq}}{3 \cdot E \cdot I} \cdot \left(\frac{1}{S_b} - 1 \right)$$

oz. ker so ugotovitve S_b praviloma majhne, izraz preide v:

$$c_3 = \frac{H_{eq}}{3 \cdot E \cdot I \cdot S_b}$$

V obeh zgornjih izrazih je E elastični modul, I vztrajnostni moment konzole in H_{eq} višina ekvivalentne konzole, ki se določi iz pogoja $H_{eq} = M/Q$, pri čemer je M upogibni moment in Q prečna sila ob vpetju dejanske in ekvivalentne konzole.

2.2.2.2 Teorija drugega reda (TDR) pri stenah – upoštevanje $P-\Delta$ efekta

Bo dopolnjeno!

3. UPORABA PROGRAMA

3.1 Priprava podatkov

3.1.1 Vhodna datoteka za program EAVEK

Vhodno datoteko (običajno s podaljškom .INP), ki predstavlja matematični model za linearno analizo, pripravimo v skladu z navodili za pripravo podatkov za program EAVEK (Fajfar, 1987). Pri tem moramo paziti, da v modelu pri opisu elementov upoštevamo le trenutno vključene makroelemente z neelastičnimi karakteristikami (CANTILEVER in FRAME), izjema je tip TUBE, ki se v primeru nesimetričnih prostorskih konstrukcij ne plastificira. Pri opisu obtežbe podamo eno samo statično obtežbo. Ne glede na zahtevan izpis bo program izpis spremenil tako, da se bodo izpisovale vse izračunane količine (TABU ALL). Trenutno se zahteva še podatek o masah, bolj zaradi completeness in morebitne razporeditve horizontalne obtežbe po višini, ki ustreza prvi nihajni obliki.

3.1.2 Vhodna datoteka

Program NEAVEK, poleg datoteke, ki jo potrebuje program EAVEK za odsekoma linearni račun v vsakem koraku analize, potrebuje datoteko (običajno s podaljškom .SPL) s podatki o neelastičnih karakteristikah elementov. Pri tem moramo paziti, da je vrstni red elementov enak kot v vhodni datoteki (.INP) programa EAVEK. Ta zahteva je povsem smiselna, saj istočasno omogoča enostavnejšo kontrolo podatkov in zmanjšuje možnost napak pri vnosu podatkov.

Struktura .SPL datoteke je naslednja:

Prva vrstica je enaka kot v vhodni datoteki programa EAVEK

Sledi M blokov podatkov z zapisi neelastičnih karakteristik posameznih elementov, pri čemer je M število vseh elementov, vrstni red pa mora biti enak kot v vhodni datoteki programa EAVEK. Vsak blok se začne z vrstico, ki naj bo po možnosti, predvsem zaradi konsistentnosti in lažje kontrole, enaka prvi vrstici s podatki o makroelementu v vhodni datoteki programa EAVEK. Sledi opis neelastičnih karakteristik, ki ima v primeru tipa CANTILEVER naslednjo obliko:

My1
Sb

Pri tem je My1 moment na meji tečenja prve etaže (ob vpetju), Sb pa utrditev elementa. Običajno predpostavimo majhno utrditev, okoli 1% (torej 0.01), pogosto pa lahko pri stenah upoštevamo tudi večjo utrditev, vse do 10% (torej 0.1).

V primeru tipa FRAME ima zapis naslednjo obliko:

1 $\Sigma Myc1$ $\Sigma Myb1$
.
.
.
 i $\Sigma Myci$ $\Sigma Mybi$
.
.
.
 N $\Sigma MycN$ $\Sigma MybN$
Sb

Pri tem je $\Sigma Myci$ vsota momentov na meji tečenja vseh stebrov okvira v i -ti etaži (to je vsota momentov spodaj **ali** vsota momentov zgoraj – v trenutni verziji se upošteva, da so v vsaki etaži momenti stebrov spodaj enaki momentom zgoraj). $\Sigma Mybi$ označuje vsoto momentov na meji tečenja vseh prečk v i -ti etaži. Za vsako prečko je treba v vsoti upoštevati moment na obeh koncih prečke. Vrstic s podatki o momentih na meji tečenja

je N , torej toliko kot je vseh etaž elementa. Sb tudi tukaj predstavlja utrditev elementa. Običajno je to majhna številka, nekje med 0.1% in 1% (torej 0.001 in 0.01).

Na koncu podatkov o neelastičnih karakteristikah sledi še podatek o maksimalnem pomiku, do katerega se izvaja račun, če so prej plastificirani že vsi elementi. Ukaz ima naslednjo obliko:

```
MAX. DISPL.  
umax
```

Pri tem je v prvi vrstici poljuben tekstovni zapis, v primeru MAX. DISPL. V drugi vrstici sledi števična vrednost maksimalnega pomika.

Konec datoteke označimo s tekstom:

```
END SPL DATA
```

3.2 Rezultati in interpretacija rezultatov

3.2.1 Izhodna datoteka

V trenutnem izpisu so v datoteki s podaljškom *.RES* podani pomiki in pripadajoča nosilnost konstrukcije ob posameznih plastifikacijah makroelementov. Oblika zapisa omogoča enostaven grafični prikaz z drugimi programi, npr. MS Excel.

3.2.2 Interpretacija rezultatov

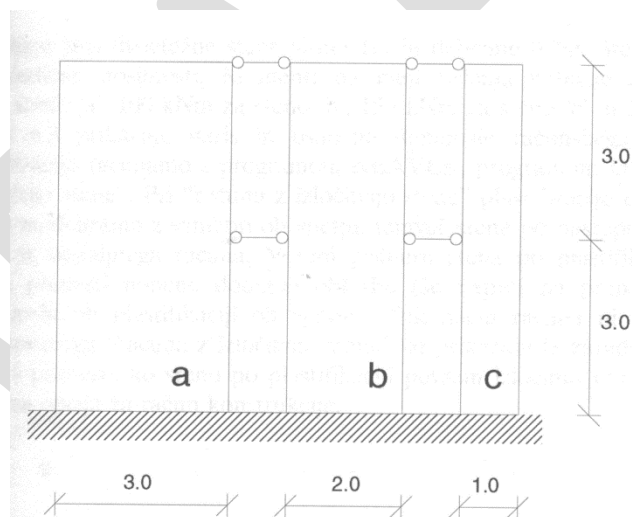
Za boljšo interpretacijo rezultatov bodo dodani izpisi, ki bodo natančno definirali tip mehanizma in plastifikacijo v posameznih etažah.

4. TESTNI PRIMERI

Testni primeri so večinoma povzeti po doktorski disertaciji Vojkota Kilarja (Kilar, 1995). Tam so rezultati vseh testnih primerov primerjani še z rezultati drugih nelinearnih modelov oz. drugih programov za nelinearno statično analizo. V tem priročniku večinoma prikazujemo samo rezultate NEAVEKa, ki se ujemajo z originalno verzijo. Primerjava z rezultati drugih modelov presega namen tega priročnika in zato niso prikazani.

4.1 Primer 1 – dvoetažna stenasta konstrukcija s tremi različnimi stenami

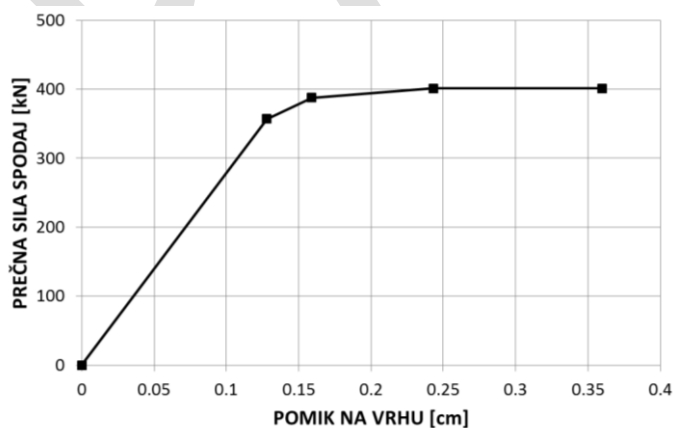
Prvi testni primer je dvo-etažna stenasta konstrukcija, sestavljena iz treh sten različnih prečnih prereзов (širine 3, 2 in 1 m ter debeline 0.2m) in armature. Stene so armirane z armaturnimi mrežami GA 500/560 in sicer Q257 ob obeh robovih, kar znaša 0.25% površine prereza. Na obeh krajiščih so na 1/10 širine stene dodane še štiri palice R Φ 12, kar znaša 0.15%, 0.22% in 0.45% površine prereza posamezne stene. Robne palice obdajajo stremena R Φ 8/15cm. Momenti na meji tečenja natezne armature tako znašajo 1273 kNm za steno **a**, 578 kNm za steno **b** in 154 kNm za steno **c**. V sliki 4.1.1 je prikazan naris računskega modela obravnane konstrukcije. Vhodni datoteki za program NEAVEK sta prikazani v tabeli 4.1.1, rezultati nelinearne statične postisne analize pa v sliki 4.1.2.



Slika 4.1.1: Dvoetažna stenasta konstrukcija s tremi stenami.

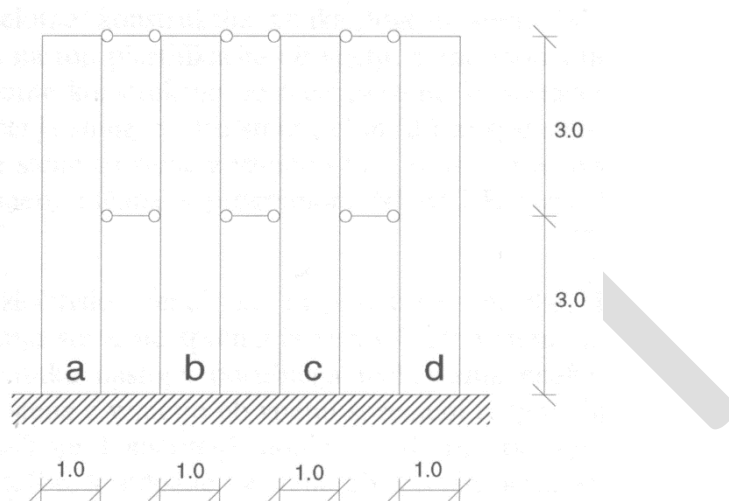
Tabela 4.1.1: Vhodni datoteki primera.

Datoteka PRMT1.INP	Datoteka PRMT1.SPL
<pre> STRUCTURE - PRIMER S TREMI STENAMI * TYPE PLANE METHOD STATIC NUMBER OF STORIES 2 NUMBER OF ELEMENTS 3 NUMBER OF LOADINGS 1 NUMBER OF MODES 3 STORIES HEIGHTS 1 THRU 2 3. CONSTANTS 30000000. 12000000. MASSES 1 THRU 2 23.23 * ELEMENT STENA a TYPE CANTILEVER SECTION PROPERTIES 1 THRU 2 0.5 0.45 * ELEMENT STENA b TYPE CANTILEVER SECTION PROPERTIES 1 THRU 2 0.33333 0.13333 * ELEMENT STENA c TYPE CANTILEVER SECTION PROPERTIES 1 THRU 2 0.16666 0.01667 * LOADING VETER TYPE STATIC TABULATE ALL STATIC LOADS 1 1. 2 2. * SOLVE </pre>	<pre> STRUCTURE - PRIMER S TREMI STENAMI ELEMENT STENA a 1273.0 0.0001 ELEMENT STENA b 578.0 0.0001 ELEMENT STENA c 154.0 0.0001 MAX. DISPL. 0.0036 END SPL DATA </pre>

**Slika 4.1.2:** Odnos med celotno prečno silo spodaj in pomikom na vrhu za konstrukcijo, sestavljeno iz treh različnih sten.

4.2 Primer 2 – dvoetažna stenasta konstrukcija s štirimi stenami enakih prerezov, vendar različnih nosilnosti

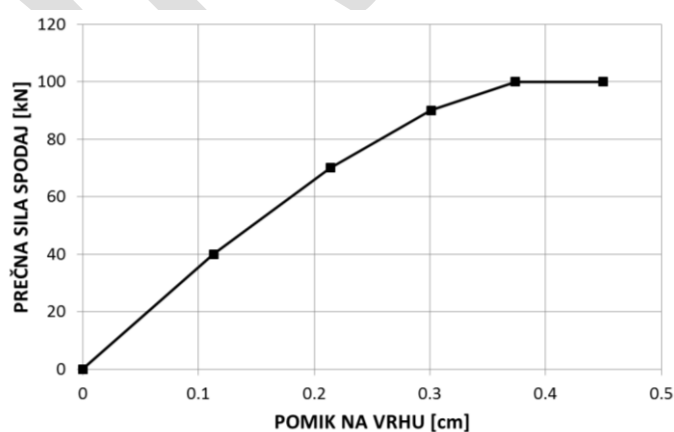
Drugi testni primer konstrukcija, ki jo sestavljajo štiri dvoetažne stene širine 1m in debeline 0.2 m. Stene imajo enake togosti in različne nosilnosti. Momenti na meji tečenja natezne armature znašajo 50 kNm za steno **a**, 100 kNm za steno **b**, 150 kNm za steno **c** in 200 kNm za steno **d**. V sliki 3.2.1 so prikazani naris in osnovne dimenzije računskega modela obravnane konstrukcije. Vhodni datoteki za program NEAVEK sta prikazani v tabeli 4.2.1, rezultati nelinearne statične postisne analize pa v sliki 4.2.2.



Slika 4.2.1: Dvoetažna stenasta konstrukcija s štirimi stenami.

Tabela 4.2.1: Vhodni datoteki primera.

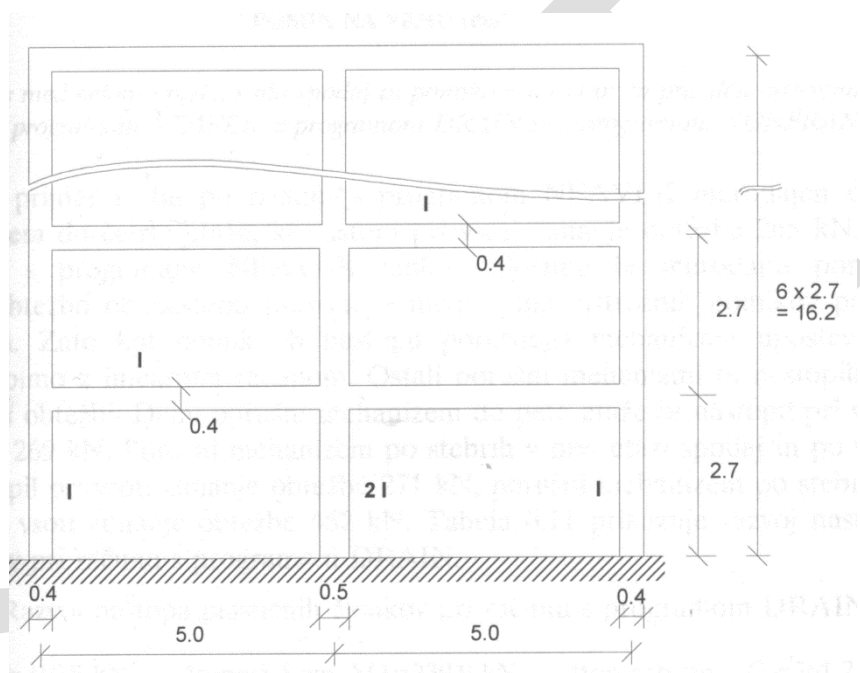
Datoteka PRIMT2.INP	Datoteka PRIMT2.SPL
<pre> STRUCTURE - PRIMER S ŠTIRIMI STENAMI * TYPE PLANE METHOD STATIC NUMBER OF STORIES 2 NUMBER OF ELEMENTS 4 NUMBER OF LOADINGS 1 NUMBER OF MODES 2 STORIES HEIGHTS 1 THRU 2 3. CONSTANTS 30000000. 12000000. MASSES 1 THRU 2 23.23 * ELEMENT STENA a TYPE CANTILEVER SECTION PROPERTIES 1 THRU 2 0.166667 0.016667 * ELEMENT STENA b TYPE CANTILEVER SECTION PROPERTIES 1 THRU 2 0.166667 0.016667 * ELEMENT STENA c TYPE CANTILEVER SECTION PROPERTIES 1 THRU 2 0.166667 0.016667 * ELEMENT STENA d TYPE CANTILEVER SECTION PROPERTIES 1 THRU 2 0.166667 0.016667 * LOADING VETER TYPE STATIC TABULATE ALL STATIC LOADS 1 1. 2 2. * SOLVE </pre>	<pre> STRUCTURE - PRIMER S ŠTIRIMI STENAMI ELEMENT STENA a 50.0 0.0001 ELEMENT STENA b 100.0 0.0001 ELEMENT STENA c 150.0 0.0001 ELEMENT STENA d 200.0 0.0001 MAX. DISPL. 0.0045 END SPL DATA </pre>

**Slika 4.2.2:** Odnos med celotno prečno silo spodaj in pomikom na vrhu za konstrukcijo, sestavljeno iz štirih sten.

4.3 Primer 3 – šestetažni dvoladijski okvir

Tretji testni primer je šestetažni okvir z etažno višino 2.7m in dvema poljema dolžine 5m. Krajni stebri so dimenzije 0.4/0.4 m in so armirani z 8R Φ 16. Srednji stebri so dimenzij 0.4/0.5 m in so armirani z 8R Φ 18. Srednji stebri imajo približno dvakratno togost krajnih stebrov. Vzeli smo, da na vsak stember odpade enak delež vertikalne obtežbe in da je osna sila v stebrih zaradi lastne in koristne obtežbe ene etaže enaka 120 kN. Osa sila v stebrih prve etaže je torej 720 kN. Momenti na meji tečenja za srednje stebre znašajo 262 kNm, za krajne stebre pa 181 kNm. Prečke so dimenzij 0.4/0.4 m in so armirane s po 4R Φ 16 ob zgornjem in spodnjem robu. Moment na meji tečenja za prečke znaša 106 kNm.

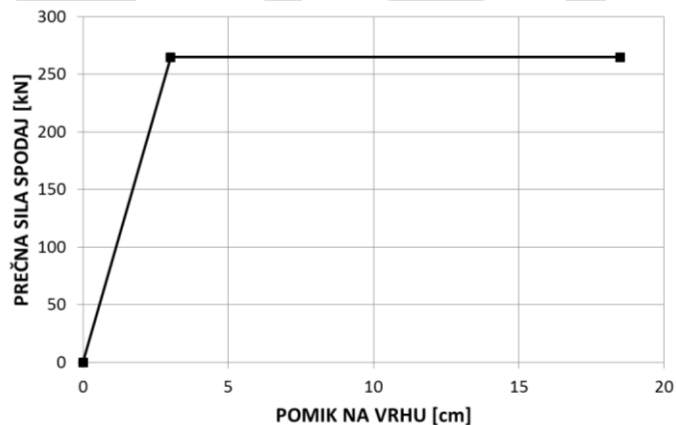
V sliki 4.3.1 so prikazani naris z osnovnimi dimenzijami računskega modela obravnane konstrukcije. Vhodni datoteki za program NEAVEK sta prikazani v tabeli 4.3.1, rezultati nelinearne statične postisne analize pa v sliki 4.3.2.



Slika 4.3.1: Šestetažni dvoladijski okvir.

Tabela 4.3.1: Vhodni datoteki primera.

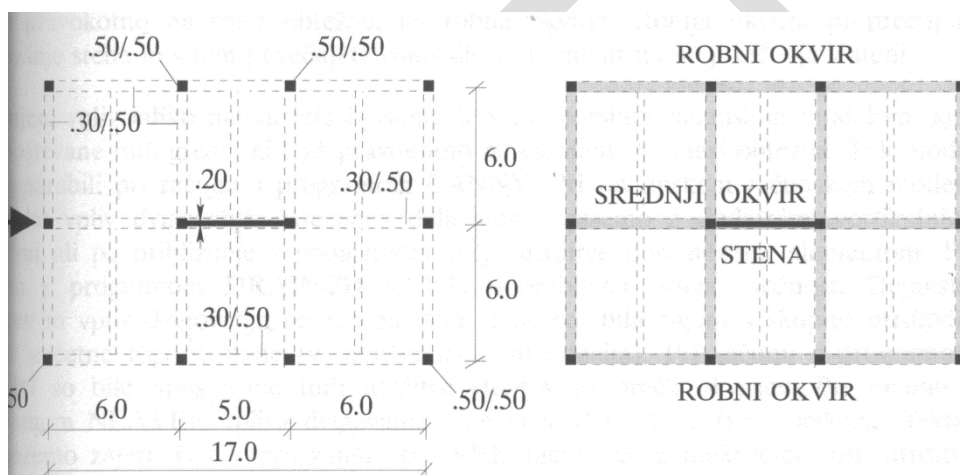
Datoteka PRINT3.INP	Datoteka PRINT3.SPL
<pre> STRUCTURE - PRIMER 6.ETAŽNEGA DVOLADIJSKEGA OKVIRA * TYPE PLANE METHOD STATIC NUMBER OF STORIES 6 NUMBER OF ELEMENTS 1 NUMBER OF LOADINGS 1 NUMBER OF MODES 6 STORIES HEIGHTS 1 THRU 6 2.7 CONSTANTS 30000000. 12000000. MASSES 1 THRU 6 23.23 * ELEMENT OKVIR TYPE FRAME SECTION PROPERTIES 1 THRU 6 0.0084333 0.0008533 * LOADING VETER TYPE STATIC TABULATE ALL STATIC LOADS 1 1. 2 2. 3 3. 4 4. 5 5. 6 6. * SOLVE </pre>	<pre> STRUCTURE - PRIMER 6.ETAŽNEGA DVOLADIJSKEGA OKVIRA ELEMENT OKVIR 1 624.0 424.0 2 624.0 424.0 3 624.0 424.0 4 624.0 424.0 5 624.0 424.0 6 624.0 424.0 0.001 MAX. DISPL. 0.185 END SPL DATA </pre>

**Slika 4.3.2:** Odnos med celotno prečno silo spodaj in pomikom na vrhu za šest-etažno dvoladijsko okvirno konstrukcijo.

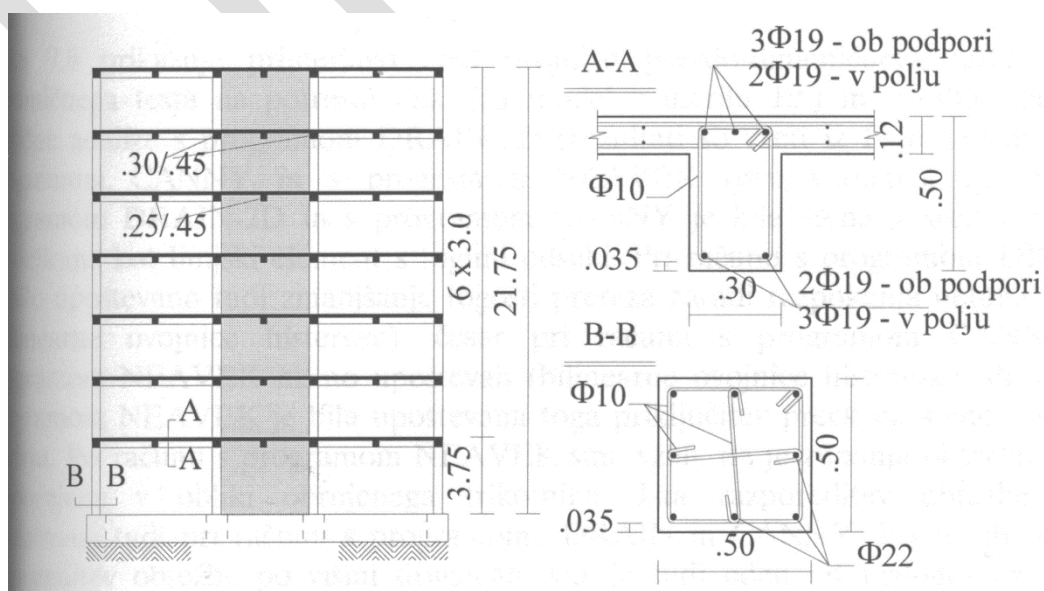
4.4 Primer 4 – sedemetažna stenasto-skeletna konstrukcija (TSUKUBA)

Četrty testni primer je sedemetažna stenasto-skeletna konstrukcija, sestavljena iz okvirjev in stene, ki je bila v naravni velikosti testirana v Tsukubi (Bertero et al, 1984). Konstrukcijo sestavljata dva robna okvirja in srednji okvir s steno v smeri X, ter štirje okvirji v smeri Y. Polnilnih sten v smeri Y in vmesnih prečnih gredah v smeri Y pri računu nismo upoštevali. Konstrukcija je simetrična. Obremenjena je z monotono naraščajočo horizontalno obtežbo v smeri X. Obtežbo predstavljajo koncentrirane sile v višini etažnih plošč in so razporejene v obliki obrnjenega trikotnika. Podatki o geometriji, materialu in nelinearnih karakteristikah konstrukcije so povzeti po Fajfarju in sodelavcih (Fajfar et al, 1985).

Slika 4.4.1 prikazuje tloris konstrukcije in razporeditev nosilnih elementov, slika 4.4.2 pa naris konstrukcije in detajla stebra in grede. Vse grede in vsi stebri imajo enake dimenzije in enako vzdolžno armaturo. Upoštevali smo, da je sodelujoča širina gred 1.5 m. Stena je armirana s horizontalno in vertikalno armaturo $\Phi 8/20$ cm. V tabeli 4.4.1 so prikazani osnovni podatki za elemente za neelastični račun.



Slika 4.4.1: Tloris sedemetažne stenasto-skeletne konstrukcije s steno v srednjem okviru.



Slika 4.4.2: Naris sedemetažne stenasto-skeletne konstrukcije s steno v srednjem okviru in detajla grede in stebra.

Tabela 4.4.1: Karakteristike prerezov.

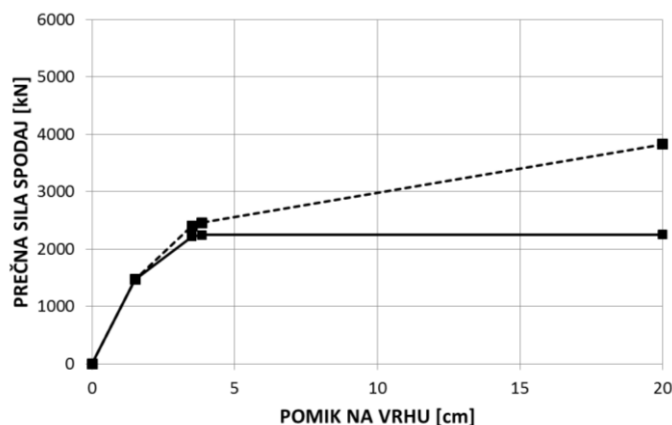
Vogalni stebri (1.etaža)		Notranji stebri (1.etaža)		Stena z robnimi stebri (1. Etaža)		Grede	
N [kN]	My[kNm]	N [kN]	My[kNm]	N [kN]	My[kNm]	N [kN]	My[kNm]
700	310	1184	384	2980	14251	87	230

Obračnavali smo dva primera. V prvem smo za vse elemente upoštevali majhno utrditev (Tabela 4.4.2), v drugem pa 10% utrditev stene v srednjem okviru. Eksperiment je pokazal, da na obnašanje konstrukcije pomembno vpliva dvig nateznega dela stene, ki ga je z enostavnim ravninskim ali celo prostorskim modelom, ki ne upošteva delovanja prečnih elementov, nemogoče zajeti drugače kot približno s podajanjem večje utrditve stene.

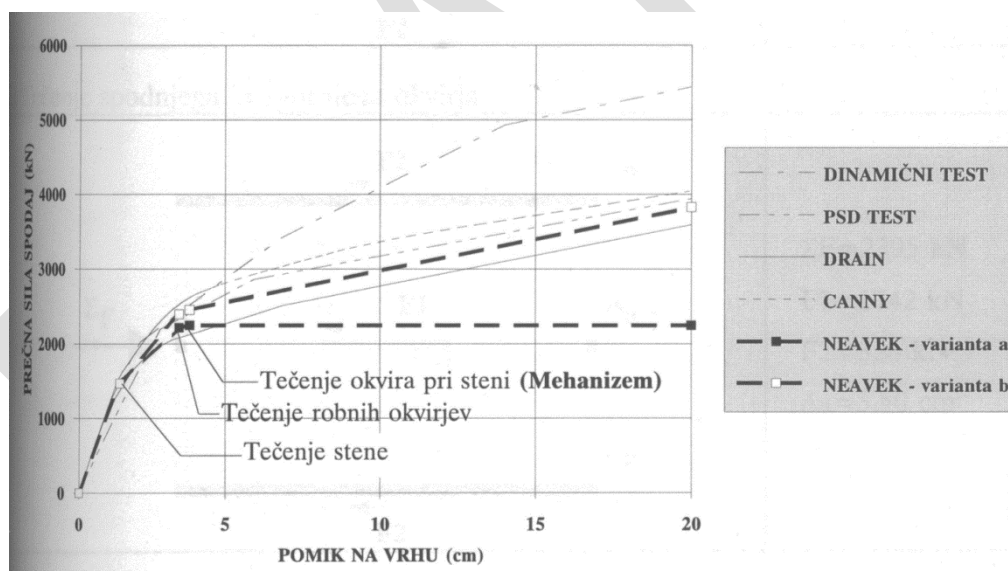
Tabela 4.4.2: Vhodni datoteki primera.

Datoteka TSUKUBA.INP	Datoteka TSUKUBA.SPL
<pre> STRUCTURE - TSUKUBA TYPE PLANE METHOD STATIC NUMBER OF STORIES 7 NUMBER OF ELEMENTS 4 NUMBER OF LOADINGS 1 NUMBER OF MODES 7 STORIES HEIGHTS 1 3.75 2 THRU 7 3.0 CONSTANTS 25000000. 10000000. MASSES 1 THRU 7 277.268066 * ELEMENT OKVIR zunanji zgornji TYPE FRAM NUMB OF STOR 7 SECT PROP 1 THRU 7 0.020832 0.0031732 * ELEMENT OKVIR zunanji spodnji TYPE FRAM NUMB OF STOR 7 SECT PROP 1 THRU 7 0.020834 0.0031734 * ELEMENT OKVIR sredina TYPE FRAM NUMB OF STOR 7 SECT PROP 1 THRU 7 0.010417 0.001983 * ELEMENT STENA sredina TYPE CANT NUMB OF STOR 7 SECT PROP 1 THRU 7 1.001000 4.654166 * LOADING VETER TYPE STATIC TABULATE ALL STATIC LOADS 1 1. 2 2. 3 3. 4 4. 5 5. 6 6. 7 7. * SOLVE </pre>	<pre> STRUCTURE - TSUKUBA ELEMENT OKVIR zunanji zgornji 1 1388.0 951.1 2 1388.0 951.1 3 1388.0 951.1 4 1388.0 951.1 5 1388.0 951.1 6 1388.0 951.1 7 1388.0 951.1 0.001 ELEMENT OKVIR zunanji spodnji 1 1388.0 951.0 2 1388.0 951.0 3 1388.0 951.0 4 1388.0 951.0 5 1388.0 951.0 6 1388.0 951.0 7 1388.0 951.0 0.001 ELEM OKVIR sredina 1 620.0 634.0 2 620.0 634.0 3 620.0 634.0 4 620.0 634.0 5 620.0 634.0 6 620.0 634.0 7 620.0 634.0 0.001 ELEMENT STENA 14251.0 0.0001 MAX. DISPL. 0.2 END SPL DATA </pre>

Slika 4.4.3 prikazuje potisni krivulji za obe varianti modela. V obeh primerih pride najprej do tečenja stene v srednjem okviru, nato do tečenja krajnih okvirov in nazadnje do tečenja srednjega okvira. Varianta z 10% utrditvijo stene se zelo dobro ujema z rezultati pseudo-dinamičnega testa in rezultati bolj natančnih modelov (npr. DRAIN (Guendelman-Israel and Powell, 1977) in CANNY (Li, 1993)).



Slika 4.4.3: Odnos med celotno prečno silo spodaj in pomikom na vrhu za sedemetažno stenasto-skeletno konstrukcijo. Polna črta označuje odziv brez utrditve elementov, črtkana črta pa odziv z 10% utrditvijo stene na sredini.



Slika 4.4.4: Odnos med celotno prečno silo spodaj in pomikom na vrhu za sedemetažno stenasto-skeletno konstrukcijo. Prikazana je primerjava rezultatov originalnega programa NEAVEK z rezultati testov in programov DRAIN in CANNY iz (Kilar, 1995).

LITERATURA

Bertero, V.V., Aktan, A.E., Charney, F.A., Sause, R. Earthquake simulation tests and associated studies of a 1/5th scale model of a 7-story reinforced concrete test structure. Report No. UCB/EERC-84/05, Berkeley, 1984.

Fajfar, P., Fischinger, M., Remec, Č. Evaluation of aseismic provisions in the USA and Yugoslavia. Publikacija IKPIR št. 28A, FAGG, Univerza v Ljubljani, 1985.

Fajfar, P. EAVEK – Program za elastično analizo večetažnih konstrukcij; publikacija IKPIR št. 13, 3. izdaja, FAGG, Univerza v Ljubljani, 1987.

Guendelman-Israel, R., Powell, G.H. DRAIN-TABS – A computer program for inelastic earthquake response of three-dimensional buildings, Report No. UCB/EERC-77/8, Berkeley, 1977.

KILAR, V. Poenostavljena nelinearna analiza konstrukcij stavb pri horizontalni obtežbi; doktorska disertacija (mentor: akad. prof. Peter Fajfar), FGG, Univerza v Ljubljani, 171 str., 1995. [COBISS.SI-ID 152929]

KILAR, V. FAJFAR, P. Simple push-over analysis of asymmetric buildings. Earthquake eng. struct. dyn., 26(2), str. 233-249, 1997. [COBISS.SI-ID 85857]

Li, K.N. CANNY-C – A general purpose computer program for 3-dimensional nonlinear dynamic analysis of building structures, Research report, National University of Singapore, Department of Civil Engineering, Singapore, 1993.