

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za konstrukcije in potresno inženirstvo

OPIS IN PRIMER NELINEARNE STATIČNE ANALIZE S PROGRAMOM SAP ALI ETABS

Študijsko gradivo za podiplomske študente konstrukcijske smeri pri predmetu Dinamika gradbenih konstrukcij z uporabo v potresnem inženirstvu

Matjaž Dolšek

Ljubljana, marec 2004

VSEBINA

1. NELI	NEARNA STATIČNA ANALIZA S PROGRAMOM SAP ALI ETABS	
2. SPLC	ŠNE LASTNOSTI PLASTIČNIH ČLENKOV	4
2.1.	Določitev momentnega členka (M2,M3)	5
2.2.	Določitev interakcijskega členka osna sila – moment (P-M2-M3, PMM)	6
3. PRIM	IER: KONZOLA Ž NESIMETRIČNIM MOMENTNIM ČLENKOM	8
3.1.	Dpis naloge	8
3.2. I	Rešitev	8
3.3. I	Rešitev s programom SAP	9
3.3.1.	Definicija mreže	9
3.3.2.	Definicija materiala	9
3.3.3.	Definicija prereza	10
3.3.4.	Risanje elementa in podpore	10
3.3.5.	Definicija in prirejanje plastičnega členka	10
3.3.6.	Definicija obtežnega primera	10
3.3.7.	Definicija nelinearne statične analize	11
3.3.8.	Račun in rezultati analize	12
3.4. I	Rešitev s programom ETABS	13
4. PRIM	IER: ŠTIRI-ETAŽNI ARMIRANOBETONSKI OKVIR	14
4.1. 0	Opis problema	14
4.2.	Račun interakcijskih diagramov s programom SAP ali ETABS	15
4.3.	Določevanje rotacije na meji tečenja in mejne rotacije	15
4.4. 0	Oblika ovojnic za plastični členek	16
4.5.	Rezultati analize	18
5. LITE	RATURA	20

1. NELINEARNA STATIČNA ANALIZA S PROGRAMOM SAP ALI ETABS

V tem gradivu se bomo omejili predvsem na vrsto nelinearne statične analize, ki se običajno uporablja v potresnem inženirstvu. Programa SAP in ETABS s stališča materialne nelinearnosti omogočata modeliranje nelinearnosti v diskretnih točkah linijskih elementov. Večinoma so splošni opisi povzeti po različnih delih priročnikov za program SAP ali ETABS (CSI 2002).

Nelinearna statična analiza je lahko sestavljena iz poljubnega števila zaporednih obtežnih primerov. Vsaki nelinearni analizi lahko priredimo različno obtežbo. Običajno se nelinearna statična analiza izvaja v treh korakih:

- nelinearna analiza zaradi lastne teže,
- nelinearna statična analiza zaradi prve oblike horizontalnih sil (izhaja iz nelinearne analize zaradi lastne teže),
- nelinearna statična analiza zaradi druge oblike horizontalnih sil (izhaja iz nelinearne analize zaradi lastne teže).

Pri nelinearni analizi zaradi lastne teže se običajno krmili sila (*Force Control*), pri nelinearni analizi zaradi horizontalnih sil (»pushover« analiza) pa se krmilijo pomiki (*Displacement Control*).

V splošnem lahko uporabljamo različne vrste nelinearnosti:

- materialna nelinearnost v diskretnih točkah linijskih elementov (plastični členki Hinges),
- materialna nelinearnost v veznih elementih (*Link Elements*),
- geometrijska nelinearnost v vseh vrstah elementov, ki so vgrajeni v program (P-delta, teorija drugega reda).
- »postopno grajenje«. Možno je dodajanje ali odvzemanje elementov med različnimi analizami (*Static Nonlinear Staged Construction*). V tem primeru lahko krmilimo le silo.

Nelinearna statična analiza s programom SAP ali ETABS se izvaja po naslednjih korakih:

- izdelava modela, ki se uporablja za elastično analizo (definicija mreže, definicija materialov, definicija prerezov, risanje elementov in podpiranje modela, definicija obtežbe, analiza in rezultati elastične analize),
- definicija statičnega obtežnega primera, ki se uporablja za nelinearno statično analizo (*Define/Load Cases*). Za stavbe se običajno uporablja oblika sil, ki je po etažah razporejena enakomerno, po trikotniku ali sorazmerna z masam etaže in produktom določene predpostavljene deformacijske oblike. Ko definiramo obtežni primer je pomembno, da izključimo delovanje lastne teže konstrukcije (*Self Weight Multiplier* = 0),
- definicija nelinearne statične analize (*Define/Analysis Cases*). V tem koraku definiramo obtežbo, ki se uporablja v nelinearni statični analizi, ter določimo parametre nelinearne statične analize,
- definicija plastičnih členkov (*Define/Hinge Properties*). Običajno lastnosti plastičnih členkov določi uporabnik. Možno je tudi, da se lastnosti plastičnih členkov samodejno izračunajo po pravilih ATC 40 (ATC 1996) ali FEMA 273 (FEMA 1997),
- določitev plastičnih členkov linijskim elementom (Assign/ Frame/Cable /Hinges),
- zagon nelinearne statične analize (*Analyze/Run Analysis*). Nelinearna statična analiza se izvaja, če je definiran vsaj en obtežni primer za nelinearno statično analizo,
- pregled in kontrola rezultatov nelinearne statične analize (*Display/Show Static Pushover Curve*),
- izboljšanje modela, v primeru, če rezultati nelinearne analize niso sprejemljivi.

Nelinearna analiza je zahtevna. Najboljši način za izdelavo nelinearnega modela je, da se stopnja nelinearnosti modelira postopoma. V prvem koraku je najbolje izvesti statično analizo (npr. modalno analizo in analizo zaradi lastne in spremenljive obtežbe). Z rezultati te analize lahko kontroliramo elastične lastnosti našega modela. V naslednjem koraku dodamo v model plastične členke ter šele na koncu vključimo geometrijsko nelinearnost. Lastnosti plastičnih členkov določamo glede na zahtevnost analize (elasto-plastična analiza, trilinearna ovojnica z upoštevanjem mehčanja material, interakcija osna sila – moment). Z različnimi nelinearnimi analizami dobimo različne rezultate, s katerimi lahko določimo občutljivost parametrov na nelinearno analizo in podamo končno mnenje o obnašanju konstrukcije v nelinearnem območju.

2. SPLOŠNE LASTNOSTI PLASTIČNIH ČLENKOV

Vsak linijski element ima lahko več plastičnih členkov, ki so razporejeni poljubno glede na os linijskega elementa. Plastični členek predstavlja koncentrirano plastičnost (materialno nelinearnost). Plastične členke lahko definiramo za različne količine: osna sila – pomik, prečna sila – pomik, moment – zasuk ter za interakcijo med dvo-osnim upogibom in osno silo. Pri slednji vrsti plastičnega členka je tečenje definirano s površino interakcijskega diagrama, ki je določen na osnovi dvosnega upogiba in osne sile.

Obliko deformacijske količine členka lahko definiramo z obliko krivulje, ki je prikazana na sliki 1. Oblika je določena s petmi točkami: A – vedno predstavlja izhodišče; B – predstavlja točko tečenja (prvo plastičnost členka). Deformacija se v plastičnem členku ne pojavi pred točko B, čeprav je deformacija za točko B lahko podana. V tem primeru, ko podamo pomik (rotacijo) za točko B, se le ta odšteje od podanih deformacij v točki C, D, E tako, da se v plastičnih členkih upoštevajo le plastične deformacije; C – predstavlja mejno nosilnost, D – predstavlja preostalo nosilnost, po delni porušitvi; E – predstavlja popolno porušitev. Opisana je le privzeta oblika deformacijske krivulje členka, ki je definirana v FEMA-273 (FEMA 1997). Obliko ovojnice lahko poljubno spremenimo, v točkah B, C, D in E.



Slika 1. Oblika deformacijske krivulje plastičnega členka.

Vmesna stanja IO (*angl. Immediate Occupany*), LS (*Life Safety*) in CP (*Collapse Prevention*) so informativna stanja poškodovanosti (slika 1), ki jih lahko podamo za plastični členek, vendar na analizo ne vplivajo.

Obliko krivulje lahko podamo z absolutnimi vrednostmi količin, kot so sila – pomik ali moment – zasuk, ali pa obliko ovojnice definiramo z relativnimi vrednostmi in določimo razmerje med absolutnimi in relativni vrednostmi tako za pomik (zasuk) kot za silo (moment). Najbolj običajno

je, da za točke B, C, D in E podajamo relativne vrednosti tako, da sta relativni pomik (zasuk) in sila (moment) enaka 1. To so tudi privzete vrednosti.

Lastnosti plastičnih členkov lahko v programu SAP ali ETABS podamo na tri načine:

- s privzetimi lastnostmi (*Default properties*). V tem primeru uporabimo lastnosti plastičnih členkov, ki jih program določi za jeklene elemente po priporočilih FEMA-273 (FEMA 1997) ter za armiranobetonske elemente po priporočilih ATC-40 (ATC 1996). Plastičnih členkov s privzetimi lastnostmi ne moremo spreminjati. Prav tako ne moremo izpisati njihovih lastnosti, saj so odvisni od elementov, katerim plastične členke priredimo. Če uporabljamo plastične členke s privzetimi vrednostmi, je potrebno, da so prerezi linijskih elementov polno določeni, kar pomeni, da jim moramo poleg elastičnih lastnosti določiti še trdnost material (določena za privzeto oznako *STEEL* za jeklo, *CONC* za beton) in armaturo v primeru armiranobetonskih elementov. Vrste členkov s privzetimi lastnostmi so: osni členek (P), strižni (na močno os V2), momentni (na močno os M3) ter interakcijski (osna sila momenta na močno in šibko os, P-M2-M3 ali PMM). Lastnosti opisanih členkov so določene po enostavnih metodah,
- z uporabniško-določenimi lastnostmi (*User-defined properties*). Te vrste členkov lahko temeljijo na določenih spremembah členkov s privzetimi lastnostmi ali pa na popolno uporabniško določenih lastnostih. V slednjem primeru lahko lastnosti plastičnih členkov v celoti vidimo že pred nelinearno statično analizo.
- proizvedenimi lastnostmi (Generated properties). Te lastnosti so uporabljene v analizi in temelji na členkih s privzetimi vrednostmi. Lastnosti členkov lahko vidimo po opravljeni analizi vendar jih ne moremo spreminjati. Oznake za proizvedene plastične členke so v programu standardizirane (OznakaH#, Oznaka=številka linijskega elementa, H=plastični členek ter #=številka plastičnega členka; npr. F23H2 je oznaka plastičnega členka za linijski element F23, H2 pa se nanaša na drugi členek tega elementa).

Rezultate analize s plastičnimi členki so prikazani podobno kot v primeru elastične analize, razlika je v tem, da imamo lahko v primeru nelinearne elastične analize shranjene tudi vmesne rezultate, kar omogoča spremljanje nelinearnega obnašanja konstrukcije na zaslonu. Grafično lahko prikažemo tudi obliko obtežno-deformacijske krivulje (*»Pushover curve«*). Na zaslonu se glede na stopnjo dosežene plastifikacije členka le-ti obarvajo, kot je prikazano na sliki 2. Rezultate lahko prikažemo tudi tabelarično ali pa v bazi podatkov (Microsoft Access). Za program ETABS ne moremo izpisati stanja za posamezne plastične členke.



Slika 2. Barvne oznake za stanja plastifikacije členka.

2.1. Določitev momentnega členka (M2,M3)

Postopek za definicijo uporabniško določenega členka v programu SAP začnemo z ukazom *Define/Hinge Properties*, podobno v programu ETABS, z ukazom *Define/Frame Nonlinear Hinge Properties*. Odpre se nam dialogno okno, v katerem so prikazani plastični členki s privzetimi vrednostmi, omogoča pa tudi dodajanje novih uporabniško določenih členkov. Če izberemo *Define New Property* se nam odpre novo dialogno okno v katerem so prikazani vsi tipi plastičnih členkov. Izberemo plastični členek Moment M3 ali Moment M2, izločimo možnost s privzetimi vrednostmi in izberemo opcijo s katero lahko spreminjamo lastnosti plastičnih členkov (*Modify/Show*). Prikaže se dialogno okno v katerem lahko določimo potrebne lastnosti plastičnega členka (slika 3). V zgornjem desnem robu se nahaja tabela, v katero vpisujemo relativne vrednosti za moment in zasuk točk B,C,D in E. Pri sprotnem vnašanju podatkov se nam na desni strani prikazuje slika za tako definirano ovojnico. Za primer je na sliki 3 prikazana nesimetrična ovojnica plastičnega členka. Z določitvijo faktorjev za moment in zasuk, s katerimi se množijo v tabeli definirane relativne vrednosti, dokončno definiramo obliko ovojnice. Obstaja še možnost (slika 3 spodaj), da vnesemo tri stopnje obnašanja za definirano ovojnica na osnovi katerih se lahko odločamo o stopnji poškodovanosti. Te vrednostni ne vplivajo na analizo.

Slika 3. Dialogno okno za določevanje lastnosti momentnega členka.

2.2. Določitev interakcijskega členka osna sila – moment (P-M2-M3, PMM)

Podobno kot v primeru momentnega členka tudi v tem primeru definiramo obliko ovojnice za odnos med M_3/M_{3SF} in Θ_3/Θ_{3SF} (slika 4). Dodatno lahko izbiramo med dvema načinoma neelastičnega obnašanja za osno silo – pomik (enaka oblika kot za moment – rotacijo ali pa elastoplastično obnašanje). Na sliki 4 je prikazan primer, če je ovojnica za členek simetrična. Momenta na meji tečenja nam ni potrebno podajati, saj ga definriamo s krivuljami interakcijskega diagrama (slika 5). Na levi strani dialognega okna za interakcijske krivulje (slika 5) se prikaže tabela, v kateri prvi stolpec predstavlja osne sile, ostali stolpci pa se nanašajo na momente. Pozitivna osna sila vedno pomeni nateg. Prvi stolpec predstavlja momente v +M2 smeri (kot=0°), ostali stolpci pa se nanašajo na momente, ki so za določen kot zasukani glede na os 2 (npr. krivulja pod kotom 90° se nanaša na moment +M₃. V primeru, da izberemo opcijo, da je interakcijski diagram dvojno simetričen, je dovolj, da določimo le dve krivulji za momente (za kot 0° in 90°). Za večjo natančnost pa je bolje, da določimo še krivulje za vmesne kote. Pomembno je, da so momenti podani vedno pozitivni in da so krivulje med osno silo in momentov vedno konveksne. Krivulje za osno silo in moment lahko množimo s faktorjem kot je prikazano na sliki 5.

Te vrste členkov praviloma uporabljamo v stebrih. Interakcijske diagrame lahko določimo tudi s programom SAP ali ETABS tako, da definiramo SD prereze (*SD Section, SD=Section Designer*).

Deint	Managet/CE	Detetion /OE	
Folini	Momenyar		
E-	-0.2	-/	
0-	1.2	-0	
B-	-1.20	-5	
Δ	 	0.	
B	1	0.	
<u>с</u>	1.25	5	
D	0.2	5.	
E	0.2	7.	Hinge is Bigid Plast
Use Use	Yield Moment Mu	on Positive	e Negative
Use Use Acceptar	r Moment and Rotati Yield Moment Mr Yield Rotation Ro ce Criteria (Plastic R ate Occupancy	on Positive oment SF 0.001 otation SF 0.001 otation/SF) 2.	e Negative
Use Use Acceptar Immedia	r Moment and Rotati Yield Moment Mi Yield Rotation Ro ce Criteria (Plastic R ate Occupancy ≇ty	on Positive oment SF 0.001 otation SF 0.001 otation/SF) 2. 2. 4.	e Negative
☐ Use ☐ Use Acceptar Immedia Life Safa	r Moment and Rotati Yield Moment Mi Yield Rotation Ro ce Criteria (Plastic R ate Occupancy sty e Prevention	on Positive oment SF 0.001 otation SF 0.001 otation/SF 2. 4. 6.	e Negative

Slika 4. Dialogno okno za določevanje lastnosti interakcijskega členka.

	Axial Load	М	
	P	Curve 1	
		Angle 0	
1	-1	0	
2	-0.8	0.2	
3	-0.6	0.4	
4	-0.4	0.6	
5	-0.2	0.8	
6	0	1	
7	0.2	0.8	
8	0.4	0.6	Scaling
9	0.6	0.4	P 50
10	0.8	0.2	
11	1	0	M 100
12			
13			
14			 OK

Slika 5. Dialogno okno za določevanje interakcijskega diagrama.

3. PRIMER: KONZOLA Z NESIMETRIČNIM MOMENTNIM ČLENKOM

3.1. Opis naloge

Določi obtežno deformacijsko krivuljo (pomik na vrhu – sila ob vpetju) glede na močno os konzole (slika 6). Upoštevaj obtežbo s silo na vrhu konzole, ki je usmerjena v pozitivni ali negativni X smeri. Materialno nelinearnost simuliraj z diskretnim momentnim plastičnim členkom, ki se nahaja ob vpetju konzole. Višina konzole znaša 100 cm, prerez je pravokoten (30/20 cm). Elastični modul je enak E=3000 kN/cm², poissonov količnik naj bo enak 0.2. Lastnosti plastičnega členka (slika 7):

- moment na meji tečenja znaša 1000 kNcm za pozitivno smer momenta, ki vrti v pozitivni smeri osi Y, ter 2000 kNcm za negativno smer momenta. Za točki na meji tečenja ni plastične rotacije.
- **F**

Slika 6. Konzola.

- maksimalni moment je dosežen pri momentu 1100 kNcm in 2200 kNcm za pozitivno in negativno smer plastičnega členka. Razmerje med rotacijo in faktorjem znaša 5 za pozitivno in 7 za negativno smer. Faktorja, s katerim pomnožimo definirana razmerja, da dobimo absolutno vrednost rotacije (rad) pa znašata 0.001 za pozitivno in 0.01 za negativno smer.
- razmerja rotacija/faktor se za pozitivno in negativno smer povečajo na 8 in 10, momenti pa ostanejo nespremenjeni.
- Pri razmerju rotacija/faktor 50 in 30, za pozitivno in negativno smer momenta, pade vrednost momenta na nič.

3.2. Rešitev

Pomik u_{el} konzole, z upoštevanjem elastičnih strižnih in upogibnih deformacij (»elastični« pomik), obremenjene s horizontalno silo P, je enak

$$u_{el} = \frac{Pl^3}{3EI} + \frac{Pl}{GA_s},\tag{1}$$

kjer je l višina konzole (100 cm), I vztrajnostni moment (45000 cm⁴), A_s strižni prerez (500 cm²), E elastični modul (3000 kN/cm²) ter G strižni modul (1250 kN/cm²). V primeru, ko se pojavijo plastične rotacije v členku, pa je pomik sestavljen iz elastičnega in plastičnega dela

$$u = u_{el} + u_{pl} \tag{2}$$

kjer je $u_{pl} = \Theta_{pl} l$ produkt plastične rotacije členka in dolžine konzole. Ker je zveza med momentom v členku *M* in silo *P* znana *M* = *Pl*, lahko odnos med silo *P* in pomikom na vrhu konzole *u* enostavno računamo za prelomne točke plastičnega členka. Plastični členek se obnaša, kot je prikazano na sliki 3 ali 7. Zato imamo naslednje računske korake:

- točka B, predstavlja mejo elastičnosti. V tem primeru, k pomikom prispeva le u_{el}. Mejne vrednosti momenta v točki B so 1000 kNcm (-2000 kNcm). Vrednost v oklepaju se nanaša na negativno smer. Sila ob vpetju, razmerje med momentom in višino konzole, znaša 10 kN (-20 kN). Pomik v točki B izračunamo z enačbo (1), ki znaša 0.0263 cm (-0.0526 cm),
- točka C, predstavlja mejo prvega plastičnega dela. V tem primeru je sila P enaka 11 kN (-22 kN). Elastični del pomika izračunamo po enačbi (2). Pomik na vrhu konzole, ki je posledica plastične rotacije členka pa izračunamo kot produkt plastične rotacije in dolžine konzole. Normirana plastična rotacija v točki C (slika 3) znaša 5 (-7). Absolutno vrednost plastične rotacije v točki C izračunamo kot produkt faktorja 0.001 (0.01) in normiranih

plastičnih rotacij. Dobimo, da znaša plastična rotacija v točki C 0.005 (-0.07). Z uporabo enačbe (2) sedaj izračunamo pomik na vrhu, ki znaša 0.5289 cm (-7.0578 cm),

- točka D, predstavlja mejo drugega plastičnega dela. Podobno kot za točko C, le da je v tem primeru normirana plastična rotacija enaka 8 (-10). Pomik, po enačbi (2) je enak 0.8289 cm (-10.0578 cm),
- točka E, predstavlja popolno porušitev. To je stanje, kot členek ne prevzame nobenega momenta, sila na vrhu je takrat enaka 0. Zato k pomikom prispeva le drugi člen v enačbi (2). Plastična rotacije je takrat enaka 0.05 (-0.3). Pomik je torej enak produkt plastične rotacije in višine konzole ter znaša 5 cm (-30 cm).



Slika 7. Lastnosti plastičnega členka izražene z normiranimi vrednostmi.

3.3. Rešitev s programom SAP

3.3.1. Definicija mreže

Z ukazom *File/New Model* začnemo z reševanjem problema. Izberemo enote (npr. kN, cm, C) ter opcijo s katero definiramo le mrežo modela (*Grid Only*). V novem dialognem oknu za število mrež v vseh smereh izberemo 1, za razmak pa 100 cm. Potrdimo. Na zaslonu se prikažeta dva okna, v katerih je zrisana mreža, ki smo jo pravkar definirali. Ker imamo le eno konzolo, lahko to mrežo še poenostavimo. Z miško se postavimo na mrežo in kliknemo na desno tipko miške. Odpre se dialogno okno v katerem izberemo ukaz *Edit Grid Data*. Tu lahko urejamo mrežo. V našem primeru zbrišemo mrežo tako, da imamo le eno os v koordinatnem izhodišču. Po končanem urejanju mreže shranimo primer, kar storimo tudi nekajkrat med ostalimi procesi ustvarjanja modela.

3.3.2. Definicija materiala

V zavesnem meniju izberemo ukaz *Define/Materials* [2], izberemo CONC (privzeta oznaka za material betona) in izberemo opcijo *Modify/Show Material*. Odpre se dialogno okno v katerem spremenimo podatke o materialu (za elastični modul 3000 kN/cm² in za poissonov količnik 0.2). Za težo in maso materiala izberemo vrednost 0. Ostalih lastnosti o materialu ni potrebno spreminjati, saj ne vplivajo na našo analizo.

3.3.3. Definicija prereza

Prereze definiramo z ukazom *Define/ Frame/Cable Sections*. Iz zavesnega menija, ki se pojavi v odprtem dialognem oknu izberemo opcijo *Add/Rectangular* ter izberemo *Add New Property*. Tako se nam pojavi novo dialogno okno v kateremu definiramo količine pravokotnega prereza. Določimo ime prereza (program ponudi oznako FSEC1, to je standardna oznaka v programu F=okvir (*Frame*) SEC=prerez (*Section*) in 1 številka prereza). Izberemo vrsto materiala CONC, ki smo jo prej definirali ter določimo globino (*Depth*) 20 cm, ki je dimenzija v smeri lokalne osi 3 in širino (*Width*) 30 cm, ki je dimenzija v smeri lokalne osi 2. Lokalna os 2 je za vertikalne elemente usmerjena v smeri lokalne osi X, lokalna os 3 pa v smeri globalne osi Y, vendar le, če je os elementa usmerjena v pozitivni smeri globalne osi Z.

3.3.4. Risanje elementa in podpore

Z ukazom *Draw/Draw Frame/Cable Element* $\$ izberemo način za risanje linijskih elementov. Pokaže se dialogno okno v katerem izberemo naš prerez (*Property*). Kliknemo v koordinatno izhodišče in povlečemo kazalec v drugo točko elementa. Pred tem izberemo ikono $\stackrel{1}{\rightarrow}$ s katero definiramo, da se kazalec prilepi na presečišča mreže in na točke. Sedaj, ko smo narisali naš element, ga lahko podpremo. Namesto načina risanja vključimo način označevanja (*Draw/Set Select Mode*). Točko elementa, ki jo želimo podpreti, s klikom nanjo označimo ter izberemo ukaz *Assign/Joint/Restraints* . Prikaže se dialogno okno v katerem izberemo togo vpetost za vse prostostne stopnje. Sedaj, ko smo definiral naš model, lahko (npr. v sosednjem oknu) izberemo pogled za 3D predstavitev našega modela. To storimo tako, da izberemo ukaz *View/Set Display Options* \blacksquare in izberemo opcijo *Shade Object*.

3.3.5. Definicija in prirejanje plastičnega členka

Plastični členek (*Hinge*) definiramo z ukazom *Define/Hinge Properties*. Ker bomo za členek definirali odnos moment – zasuk (M₃-Θ₃) izberemo privzeto vrsto členka *Default-M3* in izberemo opcijo *Define New Property*. Prikaže se novo dialogno okno v katerem so prikazane vse vrste plastičnih členkov, označena pa je le vrsta momentenga členka v smeri moementa M₃. Ker bomo podali uporabniško definirane lastnosti členka odznačimo opcijo *Default* in izberemo *Modify/Show for M3*. Prikaže se dialogno okno v katerem definiramo lastnosti členka. Glede na podatke v nalogi izberemo lastnosti členka, kot so prikazane na sliki 3. Ko potrdimo, se ustvari nov členek z oznako FH1, ki ga priredimo konzoli ob vpetju. To storimo tako, da s označimo konzolo (kliknemo nanjo) ter izberemo ukaz *Assign/ Frame/Cable /Hinges*. Prikaže se novo dialogno okno, v katerem izberemo vrsto plastičnega členka (izberemo FH1) in relativno lokacijo (v našem primeri 0) glede na označene elemente. S potrditvijo označenemu elementu priredimo plastični členek. Pri prirejanju in ustvarjanju plastičnih členkov je pomembno, da smo pozorni na lokalne koordinatne osi.

3.3.6. Definicija obtežnega primera

Definirati je potrebno le en obtežni primer in sicer s točkovno silo na vrhu konzole. Najprej definiramo ime in vrsto obtežnega primera (*Define/Load Cases*). Ustvari se dialogno okno v katerem so prikazani že ustvarjeni obtežni primeri. V polje *Load Name* vpišemo ime našega obtežnega primera (npr. PUSH), v naslednjem polju izberemo tip obtežbe OTHER ter v polju, s katerim definiramo ali se v tem obtežnem primeru upošteva lastna teža ali ne (*Self Weight Multiplier*), izberemo vrednost 0. Podatka za slednje dva polja v našem primeru nista bistvena. Vpisane podatke potrdimo s klikom na opcijo *Add New Load*. Definranemu obtežnemu primeru lahko sedaj priredimo obtežbo. Enako, kot v primeru predhodnega poglavja, označimo točko na vrhu konzole in izberemo ukaz *Assign/Joint Loads/Forces*. Prikaže se dialogno okno, v katerem izberemo naš obtežni primer PUSH ter določimo jakost točkovne sile (npr. 10 kN) v globalni X osi. Sama vrednost v našem primeru ni pomembna, saj bomo pri nelinearni statični analizi krmilili

pomike. Tako smo definirali obtežni primer. Silo, ki smo jo priredili modelu, lahko pogledamo z ukazom *Display/Load Assigns/Joints*.

3.3.7. Definicija nelinearne statične analize

Vrste analize za naš model in obtežbo definiramo z ukazom *Define/Analysis Cases* 2. Program že avtomatsko določi nekatere vrste analize (linearno statično analizo in modalno analizo). Nelinearno statično analizo moramo dodatno definirati. V dialognem oknu, ki se ustvari s klikom na ikono 2, izberemo opcijo *Add New Case*, v katerem izberemo nelinearno statično analizo (slika 8). Določimo obtežbo, ki se nanaša na nelinearno statično analizo. V ta namen smo predhodno definirali obtežni primer PUSH, ki ga sedaj izberemo, kot kaže slika 8. Za drugi primer ACASE2, pa izberemo, da sila deluje v negativni smeri (*Scale Factor* = -1). Dodatni parametri analize so še:

- Način krmiljenja obtežba *Load Application* (nanašamo silo ali krmilimo pomik). V našem primeru izberemo krmiljenje pomika za zgornjo točko konzole v X smeri (program bo ta pomik prepoznal sam). Za prvo analizo v pozitivni X smeri (ACASE1) izberemo končni pomik 5 cm, za drugo analizo (ACASE2, analiza v negativni X smeri) pa izberemo končni pomik 30 cm.
- Način shranjevanja rezultatov *Results Saved*. Izberemo, da bomo shranili tudi vmesne rezultate analize (*Multiple States*)
- Postopna gradnja *Staged Construction*. V tem primeru lahko simuliramo analizo po dejanskih postopkih gradnje in ne le končni rezultat. V našem primeru tega ne upotevamo.
- Nelinearni parametri Nonlinear Parameters. V tem primeru lahko določamo nelinearne parametre analize, ki se nanašajo na reševanje problema ali pa na geometrijsko nelinearnost. Če želimo nekoliko večjo natančnost, kot jo ponuja program lahko za parameter Event Lumping Tolerance (Relative) namesto 0.01 izberemo npr. 1E-3. Izberemo tudi geometrijsko linearno analizo.

			Analysis Case Type	
Analysis Case Name	ACASE1	Set Def Name	Static	•
nitial Conditions			Analysis Type	
 Zero Initial Condition 	is - Start from Unstressed S	State	C Linear	
C Continue from State Important Note: Lo cu	at End of Nonlinear Case bads from this previous cas irrent case	se are included in the	Nonlinear	
Modal Analysis Case —				
All Modal Loads Ap	plied Use Modes from	MODAL 💌		
Load PUS	H 1.	Add		
		Modify Delete		
Other Parameters		Modify Delete		
Other Parameters	Displ Control	Modify Delete Modify/Show		
Dther Parameters	Displ Control Multiple States	Modify Delete Modify/Show	OK	
Dther Parameters Load Application Results Saved Staged Construction	Displ Control Multiple States No	Modify/Show Modify/Show Modify/Show	OK	

Slika 8. Dialogno okno za definicijo nelinearne statične analize.

3.3.8. Račun in rezultati analize

Sedaj, ko smo v celoti definirali problem, poženemo analizo z ukazom Analyse/ Run analysis, s klikom na ikono i ali s tipko F5 in potrdimo opcijo Run Now. Rezultate analize lahko pregledujemo tabelarično ali grafično na konstrukciji. Na slikah 9 in 10 so prikazani rezultati za oba primera nelinearne statične analize (pozitivna in negativna smer). Obtežno deformacijsko krivuljo (Pushover Curve) zrišemo na zaslon z ukazom Display/Static Pushover Curve. Tabelo nato prikažemo z ukazom File/Display Tables, ki se nahaja v zavesnem meniju dialognega okna za obtežno deformacijsko krivuljo.



🔀 P U S H (OVER CURVE											×
File												
Step	Displacement	Base Force	A-B	B-IO	IO-LS	LS-CP	$\mathbf{CP} - \mathbf{C}$	C - D	$\mathbf{D} - \mathbf{E}$	>e t	OTAL	
0	0.0000	0.0000	1	0	0	0	0	0	0	0	1	
1	0.0263	10.0000	0	1	0	0	0	0	0	0	1	
2	0.5263	10.9948	0	0	0	1	0	0	0	0	1	
3	0.5289	11.0000	0	0	0	0	0	1	0	0	1	
4	0.8289	11.0000	0	0	0	0	0	0	1	0	1	
5	1.3289	9.6814	0	0	0	0	0	0	1	0	1	
6	1.8289	8.3628	0	0	0	0	0	0	1	0	1	
7	2.3289	7.0442	0	0	0	0	0	0	1	0	1	
8	2.8289	5.7257	0	0	0	0	0	0	1	0	1	
9	3.3289	4.4071	0	0	0	0	0	0	1	0	1	
10	3.8289	3.0885	0	0	0	0	0	0	1	0	1	
11	4.3289	1.7699	0	0	0	0	0	0	1	0	1	
12	4.8289	0.4513	0	0	0	0	0	0	1	0	1	
13	5.0000	1.211E-04	0	0	0	0	0	0	0	1	1	

Slika 9. Rezultati nelinearne statične analize za obtežbo v pozitivni smeri X osi.



Step	Displacement	Base Force	A−B	B-IO	IO-LS I	LS-CP	CP-C	C-D	$\mathbf{D} - \mathbf{E}$	>E 3	TAL	
0	0.0000	0.0000	1	0	0	0	0	0	0	0	1	
1	-0.0526	-20.0000	0	1	0	0	0	0	0	0	1	
2	-3.0526	-20.8565	0	0	1	0	0	0	0	0	1	
3	-6.0526	-21.7130	0	0	0	1	0	0	0	0	1	
4	-7.0578	-22.0000	0	0	0	0	0	1	0	0	1	
5	-10.0578	-22.0004	0	0	0	0	0	0	1	0	1	
6	-13.0578	-18.6909	0	0	0	0	0	0	1	0	1	
7	-16.0578	-15.3813	0	0	0	0	0	0	1	0	1	
8	-19.0578	-12.0718	0	0	0	0	0	0	1	0	1	
9	-22.0578	-8.7622	0	0	0	0	0	0	1	0	1	
10	-25.0578	-5.4527	0	0	0	0	0	0	1	0	1	
11	-28.0578	-2.1432	0	0	0	0	0	0	1	0	1	
12	-30.0000	-6.056E-04	0	0	0	0	0	0	0	1	1	
9 10 11 12	-22.0578 -25.0578 -28.0578 -30.0000	-8.7622 -5.4527 -2.1432 -6.056E-04	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	1 1 1 0	0 0 0 1	1 1 1 1	

Slika 9. Rezultati nelinearne statične analize za obtežbo v pozitivni smeri X osi.

3.4. Rešitev s programom ETABS

Problem s programom ETABS rešujemo podobno kot s programom SAP. Edina razlika je, da je vnašanje podatkov nekoliko spremenjeno. To pomeni, da so nekateri ukazi nekoliko drugače poimenovani ali da so dialogna okna drugače organizirana (npr. določanje nelinearne statične analize je v ETABSU drugače organizirano kot v SAP, čeprav izbiramo med enakimi možnostmi).

4. PRIMER: ŠTIRI-ETAŽNI ARMIRANOBETONSKI OKVIR

4.1. Opis problema

Štiri etažni okvir (slika 10) analiziraj z nelinearno statično analizo. V nelinearni analizi upoštevaj vpliv lastne+spremenljive obtežbe (slika 11) ter obliko horizontalnih sil (slika 12). Elastični modul znaša 2750 kN/cm². Povprečna izmerjena vrednost tlačne trdnosti betona $f_c=1.6$ kN/cm², meje elastičnosti jekla pa $f_v=34.36$ kN/cm².



Slika 10. Štiri-etažni armiranobetonski okvir.



Slika 11. Vpliv zaradi lastne in spremenljive obtežbe.



Slika 12. Oblika horizontalnih sil.

4.2. Račun interakcijskih diagramov s programom SAP ali ETABS

Interakcijski diagrami se v programu SAP ali ETABS računajo s pomočjo orodja *Section Designer* (*SD*) (*Define/Frame/Cable Sectinon/ Add SD Section*). Interakcijske diagrame uporabljamo za določitev odpornostnih momentov plastičnih členkov. Program izpiše interakcijski diagram (moment – osna sila) za različne kote glede na lokalno os 3 (slika 13) iz katerih lahko odčitamo odpornostni moment za željeno osno silo, ki je podatek za momentni plastični členek. Za lastnost interakcijskega (osna sila – moment) plastičnega členka pa uporabimo kar interakcijski diagram določen z orodjem *SD*.

	F	M3	M2	
	-1502.1128	0.	0.	
:	-1297.7601	17.2154	0.	
	-1145.4502	27.6689	0.	
1	-976.0486	36.4764	0.	
	-794.4069	43.2789	0.	
i	-592.1383	48.697	0.	
'	-472.6258	46.7887	0.	
	-353.1134	42.6486	0.	
-	-222.2612	35.4376	0.	
0	23.9866	17.4555	0.	P MJ
1	232.9608	0.	0.	
2				JD View
3				315 Dien
4				
5				35
6				
7				
8				3d MM PM3 PM

Slika 13. Inerakcijski diagram določen s programom SAP.

Če želimo, da se interakcijski diagram izračuna po EC 2 (za napetosti v betonu je privzeto, da so konstante na 0.8 dolžine tlačne cone) moramo to definirati z *Options/Preferences/Concrete Frame Design*.

Če želimo, da program ne upošteva varnostnih faktorjev za material izberemo za varnostne vrednost 1, za beton pa lahko tudi 0.8, kar predstavlja faktor α .

4.3. Določevanje rotacije na meji tečenja in mejne rotacije

Najbolj enostaven način za določevanje rotacije na meji tečenja se lahko izpelje ob predpostavki obojestransko vpetega stebra, pri čemer se za rotacijo upošteva ramerje med pomikom na vrhu in višino stebra:

$$\Theta_{y} = \frac{M_{y}l}{6(EI)_{eff}},$$
(3)

kjer je M_y moment na meji tečenja (v našem primeru odpornostni moment, ki je določen iz interakcijskega diagrama), l dolžina stebra ter $(EI)_{eff}$ efektivna togost, za katero se običajno privzame vrednost 0.5EI.

Mejne rotacije, ki so značilne za obnašanje blizu porušitve armiranobetonskega elementa se lahko določijo po priporočilih EC 8 (EC8-3, 2003):

$$\theta_{u} = a_{st} \left(1 - 0.38a_{cyc} \right) \left(1 + \frac{a_{sl}}{1.7} \right) \left(1 - 0.37a_{wall} \right) \cdot \left(0.3^{\nu} \right) \left[\frac{\max\left(0.01, \omega' \right)}{\max\left(0.01, \omega \right)} f_{c} \right]^{0.2} \left(\frac{L_{\nu}}{h} \right)^{0.425} 25^{\alpha \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_{c}}} \left(1.45^{100\rho_{d}} \right)^{0.425} \cdot \left(1.45^{$$

a_{cyc}	1 v primeru ciklične obtežbe, 0 za monotono obtežbo
a _{st}	0.016 za vroče valjano jeklo, 0.0105 za hladno oblikovano jeklo
a _{sl}	1 če se pojavi zdrs armature, 0 če ni zdrsa armature
a_{wall}	1 za stene, 0 za stebre in grede
$\nu = \frac{N}{A_c f_c}$	Normirana osna sila v elementu
f_c	Trdnost betona
f_y	Natezna trdnost vzdolžne armature
f_{yw}	Natezna trdnost stremenske armature
$\omega' = \frac{A_{st}}{A_c} \frac{f_y}{f_c}, \omega = \frac{A_{st}}{A_c} \frac{f_y}{f_c}$	Mehanski delež armiranja v tlačni in natezni coni A'_{st} , A_{st} površina tlačne in natezne armature, A_c površina betona
$\rho_{sx} = \frac{A_{sx}}{b_w s_h}$	Delež stremenske armature vzporedno s smerjo obtežbe. s_h =razmak stremen
$ ho_{d}$	Delež diagonalne armature
L_{v}	Razdalja med preučevanim prerezom in nično momentno točko
h	Širina elementa v smeri obtežbe
$\alpha = \left(1 - \frac{s_h}{2b_c}\right) \left(1 - \frac{s_h}{2h_c}\right) \left(1$	$-\frac{\sum b_i^2}{6h_c b_c}$ Faktor objetja betonskega prereza. b_i =razdalje med objetimi vzdolžnimi palicami v prerezu

4.4. Oblika ovojnic za plastični členek

Upoštevali bomo dve oblike ovojnice za plastične členke. V prvem primeru, bomo predpostavili elasto-plastično obnašanje plastičnih členkov, v drugem pa trilinearno ovojnico z upadanjem nosilnosti (mehčanje). V primeru, če bi odnos moment – zasuk določevali na osnovi odnosa moment – ukrivljenost ter predpostavljene linije momentov, bi lahko lastnosti plastičnih členkov določili natančneje, predvsem za moment na meji tečenja in pripadajočo rotacijo.

Za elasto-plastično ovojnico je zadosten podatek, da vnesemo moment na meji elastičnosti, kot je prikazano na slik 13. Rotacije na meji tečenja pravzaprav ni potrebno podajati. Smiselno jo je podati le zato, da določimo stanje poškodovanosti (na primer mejno rotacijo). V tem primeru v analizi uporabljamo efektivne togosti elementov (zmanjšan elastični modul).

V primeru trilinearne ovojnice moramo poleg rotacije na meji tečenja in momenta na meji tečenja določiti še moment na meji razpok, mejno rotacijo ter rotacijo, ko je nosilnost plastičnega členka enaka 0. Za slednjo količino moramo vrednost prepostaviti (v našem primeru je predpostavljeno, da

je rotacije, ki ustreza nični nosilnosti, dvakratna vrednost mejne rotacije). Moment na meji razpok izračunamo iz elastične analize:

$$M_{cr} = W\left(f_{ct} - \frac{N}{A}\right),\tag{5}$$

kjer je W odpornostni moment, f_{ct} natezna trdnost betona (v primeru je uporabljena vrednost $0.1f_c$), N osna sila (- tlak) ter A prerez stebra ali grede.

E- D- C- B-	-1 -1 -1	-100	
D- C- B-	-1	-5	
C- B-	-1		
B-		-1	
	-1	0	
A	0	0	
В	1.	0.	
С	1.	1.	
D	1.	5.	
E	1.	100.	🔽 Hinge is Rigid Plasti
			Summetric
Immedia	ate Occupancy	Positive 2.	e Negative
Life Saf	ety	4.	
Collaps	e Prevention	6.	

Slika 13. Oblika ovojnice v primeru elasto-plastične analize.

=rai	ne Hinge	Property Data for	S21 - M3	
Edi	t			
	Point	Moment/SF	Rotation/SF	
	E-	0	-15.5	
	D-	-1	-7.75	
	¢.	-1	-1	
	B-	-0.303	0	
	A	0	0	
	В	0.303	0.	
	С	1.	1.	
	D	1.	7.75	
	E	0.	15.5	Hinge is Rigid Plastic
				Symmetric
	-Scaling fo	or Moment and Rotatio	on	
			Positive	Negative
		Vield Moment Mo	ment SE 29814	
	1 030	There woment wo		
	🗖 Use	Yield Rotation Ro	tation SF 2.168E-03	
		0.1.1.01.1.0		
	-Acceptan	ice Unteria (Plastic Ro	Positive	Negative
			lo lo	
	Immedia	ate Occupancy	<u> </u> 4.	
	Life Safe	ety	4.	
	Collaps	e Prevention	<u> </u> 6.	
				ОК
				Cancel

Slika 14. Oblika ovojnice v primeru tri-linearne ovojnice z upoštevanjem mehčanja.

4.5. Rezultati analize

Rezultate nelinearne statične analize lahko v programu SAP ali ETABS prikazujemo na različne načine. Običajno je, da najprej preverimo obtežno deformacijsko krivuljo (»pushover« krivuljo), ki je za primer trilinearnih plastičnih členkov z upoštevanjem mehčanja in geometrijske nelinearnosti, prikazana na sliki 15 (*Display/Static Pushover Curve*). Opazimo lahko, da pri sili 70 kN nastopi meja elastičnosti. Maksimalna sila (190 kN) nastopi pri pomiku na vrhu, ki je enak približno 9 cm, kar znaša nekaj manj kot 1% višine stavbe. Dejstvo, da se maksimalna sila pojavi že pri tako majhnem pomiku izhaja iz modeliranja plastičnih členkov, kjer smo predpostavili, da je v točki C že dosežen mejni moment ter, da med točko C in D ni utrditve (slika 14). Bolj pravilno bi bilo, če bi v točki C predpostavili moment na meji tečenja, ki je manjši od mejnega momenta, vendar le tega ne moremo izračunati iz interakcijskih diagramov. Potrebovali bi rezultate za odnos moment – ukrivljenost in to za vse prereze, v katerih smo definirali plastične členke. Pri pomiku okoli 18 cm se obtežna deformacijska krivulja še dodatno lomi, padanje nosilnosti je še bolj izrazito. Od tega pomika dalje določeni plastični členki prekoračijo točko D (slika 14), pojavi se mejčanje materiala.



Slika 15. Obtežna deformacijska krivulja (»pushover« krivulja) za primer TRI-GN (trilinearna ovojnica z mehčanjem, geometrijska nelinearnost).

Pomemben rezultat nelinearne statične analize predstavlja tudi porazdelitev poškodovanosti po konstrukciji. Na sliki 16 je prikazano doseženo stanje v plastičnih členkih pri pomiku 17.9 cm. To je stanje blizu porušitve, saj se ob vpetju spodnjega stebra pojavi mehčanje. Razberemo lahko tudi, da se mehanizem pretežno pojavi po stebrih in ne po gredah, kar je zahteva metode načrtovanja nosilnosti.

Na sliki 17 je prikazana primerjava med različnimi načini modeliranja. Obtežne deformacijske krivulje se nanašajo na modele z elasto-plastičnimi členki in s trilinernimi členki z upoštevanjem mehčanja. Prikazan je tudi vpliv zaradi geometrijske nelinearnosti. Obtežne deformacijske krivulje izračunane s programom SAP so primerjane z obtežno deformacijsko krivuljo določeno s programom DRAIN-2DX. V tem primeru so bili plastični členki določeni na osnovi odnosa momen-ukrivljenost in privzete oblike momentov. Po dosegi momenta na meji tečenja pa je predpostavljena utrditev, mehčanje ni upoštevano.



Slika 16. Dosežena stanja poškodovanosti v plastičnih členkih. Mejna rotacija se prvič pojavi v srednjem stebru ob vpetju. Pomik na vrhu znaša 17.9 cm (1.66%).



Slika 17. Primerjava pushover krivulj za različne vrste analize (EP – elasto-plastična ovojnica, TRI – trilinearna ovojnica z upoštevanjem mehčanja, GL – geometrijska linearnost, GN – geometrijska linearnost).

5. LITERATURA

ATC 1996. Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, Volume 1, ATC-40 Report, Applied Technology Council, Redwood City, California.

CSI 2002. SAP Manuals, ETABS Manuals, Computers & Structures Inc., Berkeley, California.

EC8-3 (2003), Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 3: Strenghtening and repair of buildings. Draft No.3 - Final Project Team Draft (Stage 34). Brussels.

FEMA 1997. *NEHRP Guidelines for Seismic Rehabilitation of Buildings*, Developed by the Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management Agency (Report No. FEMA 273), Washington, D.C.