

PUSIAU STANDŽIŲ PLIENINIŲ RĖMŲ PĖDŲ MODELIAVIMAS,
STANDŽIO IR STIPRIO NUSTATYMASŽilvinas Bučmys¹, Rimtautas Dališanskis²

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: ¹zilvinasbucmys@gmail.com; ²rimtauto@gmail.com

Santrauka. Nagrinėjamas pusiau standžių plieninių rėmų pėdų modeliavimas ir standumo nustatymo efektyvumas. Apžvelgti kolonos pėdų standumo nustatymo metodai. Apskaičiuotas kolonos pėdos pasisukimas dviem būdais: pagal analitines išraiškas, kurios pateiktos LST EN 1993-1-8 dalyje, ir baigtinių elementų programą „Solid Works“ taikant netiesinę analizę. Sumodeliuotos dvi grupės: pirmojoje keičiamas pėdos pamatinės plokštės storis, o kitoje – inkarinio varžto skersmuo. Rezultatai rodo kolonos pėdos komponentų inkarinio varžto ir pamatinės plokštės įtaką bazės kampiniam posūkiui. Iš gautų rezultatų matyti, kad pagal Eurokodą ir netiesinę analizę kampiniai posūkiai skiriasi. Mažiausias skirtumas yra 61,6 %, o didžiausias – 73,7 %. Atliekant pėdos stiprumo skaičiavimus taikomas konservatyvus modelis – skaičiuojant pagal Eurokodą 3 gautos mažesnės reikšmės negu taikant netiesinę analizę. Mažiausias skirtumas yra 37,0 %, o didžiausias – 49,0 %.

Reikšminiai žodžiai: pusiau pasiduodantys mazgai, kolonos pėda, skaitinis modeliavimas, netiesinė analizė.

Ivadas

Projektuojant konstrukcinius rėmus dažniausiai taikomi idealūs mazgų variantai. Konstruktoriai dažniausiai naudoja lankstinius (mazgas neperima lenkimo momento) arba standžius mazgus (mazgas perima lenkimo momentą). Tačiau gamybinėje praktikoje tokius mazgus sunku padaryti. Mazgai dažniausiai būna pusiau pasiduodantys, tai yra projektuojamas standus mazgas nebūna visiškai standus, o lankstinis mazgas perima nedidelę dalį momento. Dėl šios priežasties svarbu įvertinti mazgo pasisukimą, nes tai gali lemti konstrukcijos standumą ir įrašų padidėjimą. Tačiau projektuojant standžius mazgus sunaudojama daug statybinių medžiagų pamato plokštei storinti ir sąstandoms sudaryti. Sąstamos gali tapti įtempių koncentracijos vietomis ir gali praspauti kolonos sienelę (dėl šios priežasties kolonos sienelę reikia projektuoti storesnę), todėl gali pasireikšti vietinė irtis (Azzam *et al.* 2008). Tokiais atvejais ekonomiškiau būna projektuoti pusiau pasiduodančius mazgus ir leisti mazgui pasisukti, bet sutaupyti statybinių medžiagų.

Mazgų pasiduodamumą galima apskaičiuoti taikant projektavimo normas (LST EN 1993-1-8), kuriose pateikiamas komponentų metodas, įvairiuose šaltiniuose siūlomas empiriniais skaičiavimais grįstas metodikas modeliuojant baigtinių elementų programa arba eksperimentiniais metodais.

Komponentų metodas. Šį metodą taiko projektavimo normos LST EN 1993-1-8. Pagal šį dokumentą galime ap-

skaičiuoti tik standartinių dažniausiai pasitaikančių mazgų standumą ir pasisukimą. Pagal šias normas apskaičiuoti mazgo pasiduodamumą užtrunka nemažai laiko. Dėl šios priežasties šios normos ne visada yra patogios taikyti, tačiau yra siūlomi supaprastinti komponentų metodai (Eroz *et al.* 2008).

Empiriniai metodai. Šiuo metodu mazgo standumas apskaičiuojamas taikant baigtinių elementų metodo, eksperimentinio rezultato ir kitų metodų išvestas formules. Vienas dažniausiai taikomų yra Frye ir Morris metodas (Faella *et al.* 2000).

Vieni iš patikimiausių metodų yra eksperimentiniai. Juos taikant, siekiant padaryti objektyvias išvadas, neužtenka išbandyti vieno modelio, todėl bandoma keletas ar keliolika. Kadangi šis metodas reikalauja didelių materialių išteklių, dėl šios priežasties jis yra rečiau taikomas.

Dažnai taikomas baigtinių elementų metodas. Šiuo metodu galima modeliuoti įvairiausių mazgus ir nustatyti jų pasisukimą. Šis metodas yra gana tikslus ir jo rezultatai būna labai panašūs kaip ir eksperimentiniu metodu gauti rezultatai (Picard, Beaulieu 1984). Šio metodo privalumas yra tas, kad nustatant mazgo standumą galima įvertinti statybinių medžiagų fizinę netiesiškumą.

Šiame straipsnyje kolonos pėdos mazgo pasisukimas apskaičiuotas dviem būdais. Taikomas komponentų metodas, kuris aprašytas Eurokodo 1993-1-8 dalyje, ir baigti-

nių elementų metodas. Bazė modeliuojama kompiuteriniu paketu „Solid Works“ ir taikoma netiesinė analizė. Bus keičiamas plokštės storis ir inkarinių varžtų skersmuo.

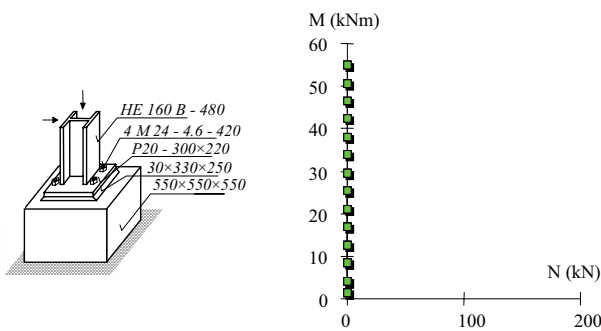
Šio darbo tikslas – nustatyti inkarinių varžtų ir plokštės matmenų poveikį mazgo pasisukimui, nustatyti taikomų metodų rezultatų skirtumus.

Pusiau pasiduodančių kolonos pėdų bandymai, aprašyti literatūroje

Yra atliktų tyrimų, kuriuose lyginami eksperimentiniai ir eurokode pateikti analitiniai skaičiavimai. Keletą tokių bandymų atliko Waldas ir kt. (Wald *et al.* 1995) ir Vandegansas (Vandegans 1997).

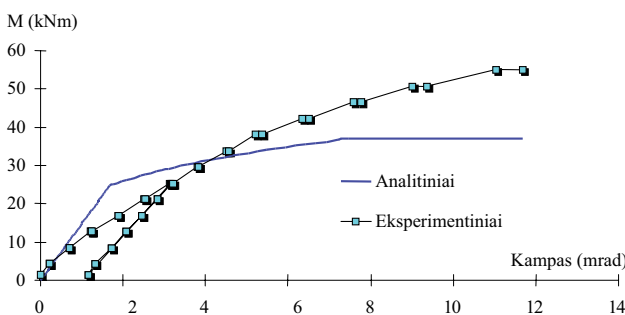
Waldo (Wald *et al.* 1995) tyrinėtus pėdos geometriniai rodikliai ir apkrovos grafikas pateikti 1 pav. Jame matyti, kad kolonos pėda sudaryta iš dvitėjo, keturių inkarinių varžtų ir betoninio pamato. Apkrova didinamas lenkimo momentas, o ašinė jėga lygi 0.

2 pav. pateikti analitinio skaičiavimo rezultatai pagal eurokodą ir eksperimentinio bandymo, kurį atliko Waldas ir kt. (Wald *et al.* 1995), rezultatai. Pateiktame paveiksle matyti, kad didinant lenkimo momentą, kai ašinė jėga išlieka 0, eksperimentiniais bandymais gauti poslinkiai buvo didesni už analitiniu būdu prognozuotus iki to momento, kol pasiekama stiprumo riba pagal Eurokodą.



1 pav. Kolonos pėdos mazgas ir apkrovos grafikas (Wald *et al.* 1995)

Fig. 1. Column base connection and load diagram (Wald *et al.* 1995)

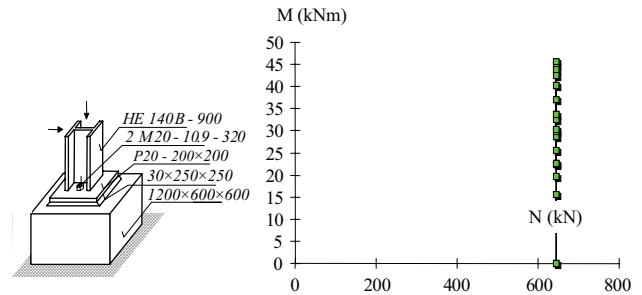


2 pav. Eksperimento rezultatai (Wald *et al.* 1995)

Fig. 2. The results of the experiment (Wald *et al.* 1995)

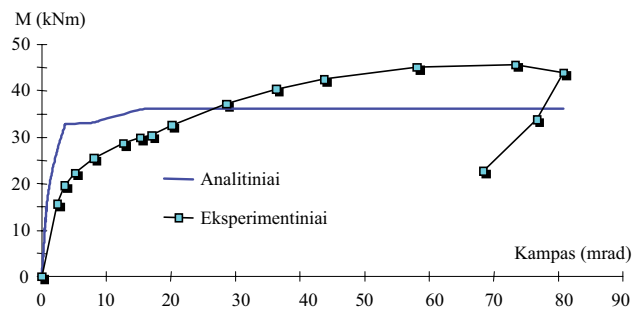
3 pav. pateikta Vandeganso (Vandegans 1997) eksperimente išbandytos kolonos pėdos geometriniai rodikliai ir apkrovos didėjimo grafikas.

4 paveiksle pateikti Vandeganso (Vandegans 1997) eksperimento duomenys. Grafike matyti, kad eksperimentiniai pasisukimai (iki Eurokode apskaičiuotos stiprumo ribos) yra didesni už nurodytus Eurokode.



3 pav. Kolonos pėdos mazgas ir apkrovos grafikas (Vandegans 1997)

Fig. 3. Column base connection and load diagram (Vandegans 1997)



4 pav. Eksperimento rezultatai (Vandegans 1997)

Fig. 4. The results of the experiment (Vandegans 1997)

Komponentų metodas. LST EN 1993-1-8 siūlomas metodas

LST EN 1993-1-8 siūlo skaičiuoti komponentų metodu. Skaičiuojant pagal pateiktą metodiką, kolonos pėdos standį lemia komponentai, kurie yra tampiamojoje ir gniuždomojoje zonose. Jei jėgos petys mažesnis už pusės kolonos skerspjūvio ilgį, tai mazgo standį veikia tik gniuždomas betonas po kolonos juostomis, o jei atvirkščiai, tai dar lemia lenkiama plokštė ir inkariniai varžtai.

Mazgo standis apskaičiuojamas pagal šią formulę:

$$S_{j,ini} = \frac{E \cdot z^2}{\mu \left(\frac{1}{k_T} + \frac{1}{k_C} \right)} \cdot \frac{e}{e + e_k}, \quad (1)$$

čia: E – plieno tamprumo modulis; $z = z_T + z_C$ yra petys, kuris parodytas 5 paveiksle; e – veikiančios apkrovos eks-

centricitetas; $e_k = \frac{z_C \cdot k_C - z_T \cdot k_T}{k_C - k_T}$; μ – standžio koeficientas, kuris lygus 1, jei tenkinama sąlyga $M_{j,Ed} \leq \frac{2}{3} M_{j,Rd}$,

o jei sąlyga netenkinama, tai $\mu = \left(\frac{1,5 M_{j,Ed}}{M_{j,Rd}} \right)^\Psi$; k_T – tem-

piamojo standžio koeficientas, kuris yra standžių k_{15} ir k_{16} suma; k_C – gniuždomojo standžio koeficientas, kuris yra k_{13} .

Gali atsirasti traukiamosios jėgos, jei pateikta sąlyga yra tenkinama:

$$L_b \leq \frac{8,8m^3 A_s}{l_{eff} t_p^3}, \quad (2)$$

čia: L_b – varžto pailgėjimo ilgis, kuris lygus 8 vardinių varžto skersmenų, plokštės storio, poveržlės ir pusės veržlės aukščio sumai; $m = s - 0,8a_c \sqrt{2}$, čia dydis s parodytas 1 paveiksle, a_c – virintinės siūlės storis; A_s – inkarinio varžto tempiamųjų įtempių plotas; t_p – plokštės storis.

Tėjinio galinio elemento juostos efektyvusis ilgis apskaičiuojamas:

$$l_{eff} = d_c + 2c, \quad (3)$$

čia: d_c – kolonos skerspjūvio plotis; $c = 1,25t_p$.

Lenkimo dėl tempimo veikiamos pėdos plokštės, kai yra traukiamosios jėgos, standžio koeficientas apskaičiuojamas:

$$k_{15} = \frac{0,85 l_{eff} t_p^3}{m^3}. \quad (4)$$

Lenkimo dėl tempimo veikiamos pėdos plokštės, kai nėra traukiamųjų jėgų, standžio koeficientas apskaičiuojamas:

$$k_{15} = \frac{0,425 l_{eff} t_p^3}{m^3}. \quad (5)$$

Tempimo veikiamų inkarinių varžtų, kai yra traukiamosios jėgos, standžio koeficientas apskaičiuojamas:

$$k_{16} = \frac{1,6 A_s}{L_b}. \quad (6)$$

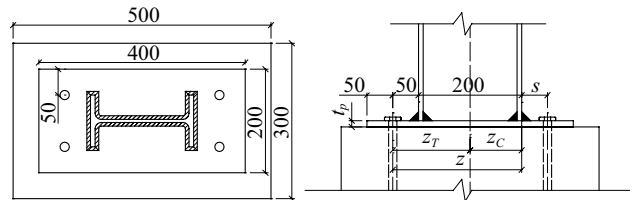
Tempimo veikiamų inkarinių varžtų, kai nėra traukiamųjų jėgų, standžio koeficientas apskaičiuojamas:

$$k_{16} = \frac{2 A_s}{L_b}. \quad (7)$$

Gniuždymo veikiamo betono standžio koeficientas apskaičiuojamas:

$$k_{13} = \frac{E_c \sqrt{b_{eff} l_{eff}}}{1,275 E}, \quad (8)$$

čia: E_c – betono tamprumo modulis; $b_{eff} = t_c + 2c$, kur t_c – kolonos lentynos storis.



5 pav. Modeliuojamos kolonos pėdos mazgas

Fig. 5. Bolted column base plate connection

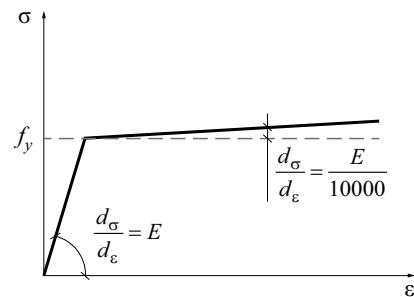
Kolonos pėdos modeliavimas baigtiniais elementais

Modelio matmenys. Modelis buvo sukurtas pagal 5 paveiksle pateiktą sceną. Kolona – IPE200 dvitėjis profiliuotis. Šis profiliuotis privirintas iš visų pusių 5 mm storio virintine siūle prie pamato plokštės, kurios ilgis ir plotis atitinkamai yra 400 mm ir 200 mm. Pamato plokštė prijungta prie betoninio pamato (ilgis 500 mm, plotis 300 mm, aukštis 450 mm) keturiais inkariniais varžtais. Gruntas po pamatu nėra modeliuojamas, todėl pamato apačia įtvirtinta standžiai. Kadangi modelis yra simetriškas, siekiant mažinti analizės trukmę, modeliuojama tik pusė mazgo. Modeliuojamos dvi grupės.

Pirmojoje grupėje keičiamas plokštės storis. Šią grupę sudaro trys modeliai, kurių plokštės storis yra 18 mm, 20 mm, 22 mm. Inkarinio varžto skersmuo yra 16 mm.

Antrojoje grupėje keičiamas inkarinio varžto skersmuo. Šią grupę sudaro du modeliai, kurių varžtų skersmenys yra 20 mm, 24 mm. Pamato plokštės storis sumodeliuotas 20 mm storio.

Fizinės charakteristikos. Buvo skaičiuojama pagal charakteristines, o ne skaičiuotines medžiagų savybes. Plieno diagrama yra tokia, kaip parodyta 6 pav. Varžtai modeliuoti pagal 4.6 klasės LST EN 1993-1-8 pateiktus rodiklius. Kolona ir plokštė modeliuota iš S235 klasės plieno. Sumodeliuotas betonas yra C25/30 klasės.



6 pav. Plieno įtempių deformacijų diagrama netiesiniam modeliavimui

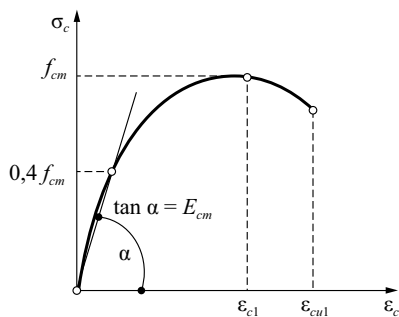
Fig. 6. Diagram of steel stress strain showing nonlinear modelling

Gniuždomo betono įtempių ir santykinų deformacijų kreivė apskaičiuota pagal LST EN 1992-1-1:2005 pateikiamą išraišką (7 pav.):

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k-2)\eta}, \quad (9)$$

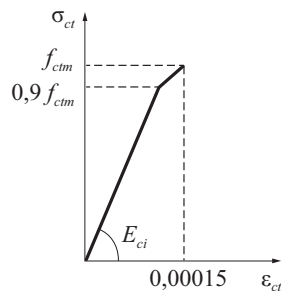
čia: $\eta = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c1}}$, kur ϵ_{c1} – gniuždomoji betono deformacija, kai yra didžiausias įtempis; $k = 1,05E_{cm} \frac{|\epsilon_{c1}|}{f_{cm}}$, kur E_{cm} – kirstinis betono tamprumo modulis, f_{cm} – vidutinis betono ritininis gniuždomasis stipris.

Tempiamojo betono įtempių ir deformacijų kreivė apskaičiuota pagal Ceb-fib modelio (Ceb-Fib Model Code 1990) pateiktas rekomendacijas (8 pav.).



7 pav. Gniuždomo betono įtempių deformacijų diagrama netiesiniam modeliavimui

Fig. 7. Diagram of concrete stress strain showing compression

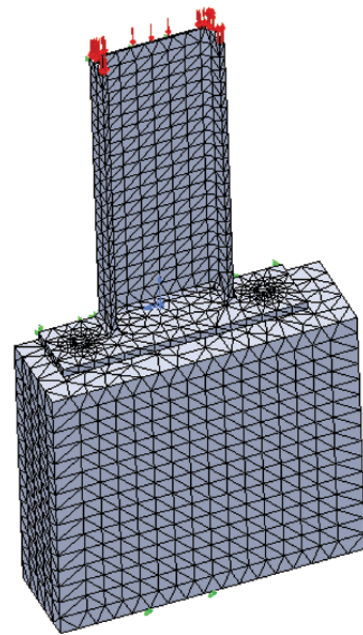


8 pav. Tempiamo betono įtempių deformacijų diagrama netiesiniam modeliavimui

Fig. 8. Diagram of concrete stress strain indicating tension

Baiginių elementų tinklas. Baiginių elementų tinklo dydis parinktas taip, kad galimomis įtempių koncentracijos vietomis jis yra patankinamas. Modelis, kuris padarytas baigtiniais elementais, parodytas 9 paveiksle.

Apkrovos. Apkrovos kiekviename modelyje yra tos pačios. Kolonos viršuje pridėta bendroji 50 kN jėga, o 50 kNm lenkiamasis momentas pridėtas kaip jėgų pora. Apkrovos pridėties vietos parodytos 9 paveiksle. Atliekant netiesinę analizę apkrova didinta per 10 žingsnių.



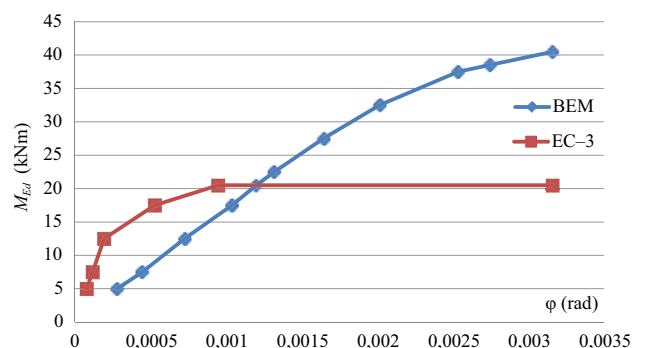
9 pav. Modeliuojamos kolonos pėdos mazgo kompiuteriniu paketu „Solid Works“ skaitinis modelis

Fig. 9. The finite element model of column base connection applying computer program *Solid Works*

Rezultatai

Buvo atliktos dvi analizės: analitinė pagal Eurokodą 3 ir netiesinė kompiuteriniu paketu „Solid Works“. Analizių rezultatai parodyti 10–14 paveiksluose.

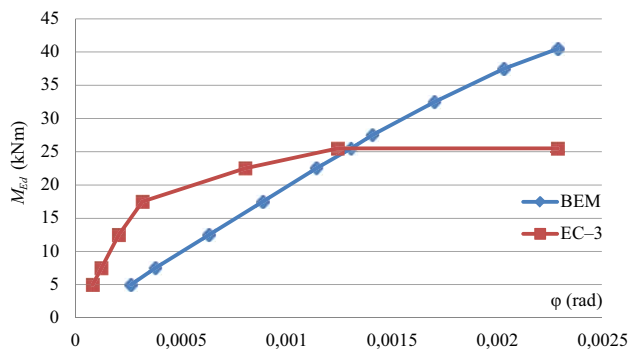
Kai inkarinio varžto skersmuo 16 mm, o plokštė – 18 mm storio, didžiausias skirtumas tarp BEM gauto posūkio ir Eurokode pateikto yra 73,7 %. Kai pasiekta lenkimo galios riba pagal Eurokodą, tada skirtumas tarp kampinių poslinkių yra 20,9 %, skirtumas tarp laikomosios galios rezultatų – 49,0 %.



10 pav. Kolonos pėdos pasisukimo grafikas. Inkarinis varžtas yra 16 mm skersmens, plokštė – 18 mm storio

Fig. 10. Diagram of column base rotation: anchor bolt diameter – 16 mm, base plate – 18 mm

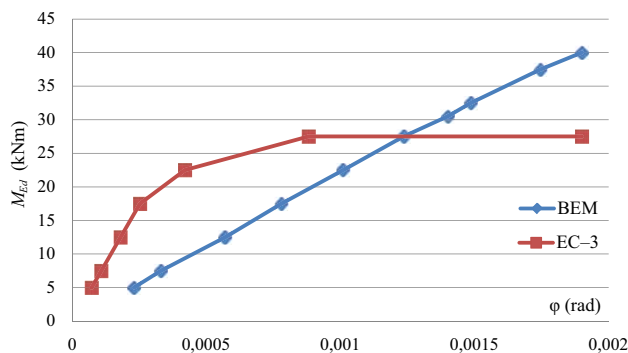
Kai inkarinio varžto skersmuo yra 16 mm, o plokštė – 20 mm storio, didžiausias skirtumas tarp BEM gauto posūkio ir Eurokode pateikto yra 64,0 %. Kai pasiekta lenkimo galios riba pagal Eurokodą, tada skirtumas tarp kampinių poslinkių yra 4,9 %, o skirtumas tarp laikomosios galios rezultatų – 37,0 %.



11 pav. Kolonos pėdos pasisukimo grafikas. Inkarinis varžtas yra 16 mm skersmens, plokštė – 20 mm storio

Fig. 11. Diagram of column base rotation: anchor bolt diameter – 16 mm, base plate – 20 mm

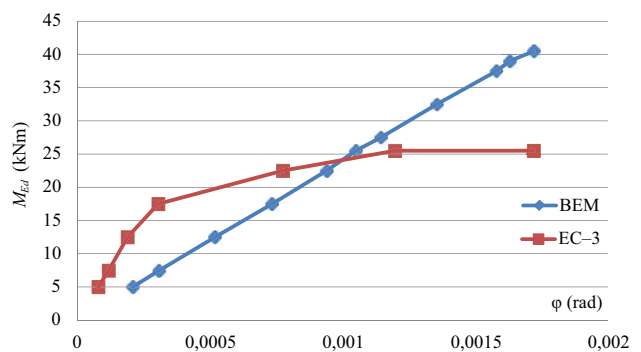
Kai inkarinio varžto skersmuo yra 16 mm, o plokštė – 22 mm storio, didžiausias skirtumas tarp BEM gauto posūkio ir Eurokode pateikto yra 68,0 %. Kai lenkimo galios riba pagal Eurokodą pasiekta, tada skirtumas tarp kampinių poslinkių yra 28,0 %, o skirtumas tarp laikomosios galios rezultatų – 31,3 %.



12 pav. Kolonos pėdos pasisukimo grafikas. Inkarinis varžtas yra 16 mm skersmens, plokštė – 22 mm storio

Fig. 12. Diagram of column base rotation: anchor bolt diameter – 16 mm, base plate – 22 mm

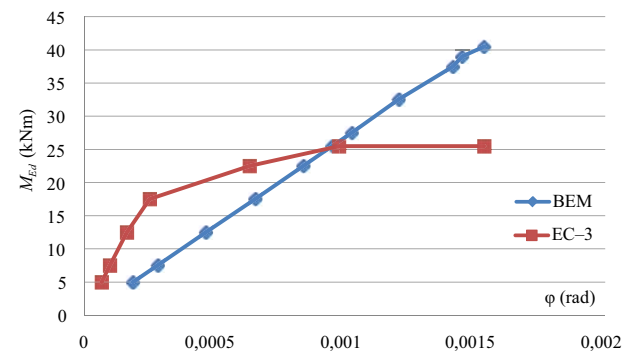
Kai inkarinio varžto skersmuo yra 20 mm, o plokštė – 20 mm storio, didžiausias skirtumas tarp BEM gauto posūkio ir pateikto Eurokode yra 61,6 %. Kai pasiekta lenkimo galios riba pagal Eurokodą, tada skirtumas tarp kampinių poslinkių yra 14,1 %, o skirtumas tarp laikomosios galios rezultatų – 37,0 %.



13 pav. Kolonos pėdos pasisukimo grafikas. Inkarinis varžtas yra 20 mm skersmens, plokštė – 20 mm storio

Fig. 13. Diagram of column base rotation: anchor bolt diameter – 20 mm, base plate – 20 mm

Kai inkarinio varžto skersmuo yra 24 mm, o plokštė – 20 mm storio, didžiausias skirtumas tarp BEM gauto posūkio ir Eurokode pateikto yra 65,4 %. Kai pasiekta lenkimo galios riba pagal Eurokodą, tada skirtumas tarp kampinių poslinkių yra 2,8 %, o skirtumas tarp laikomosios galios rezultatų – 37,0 %.



14 pav. Kolonos pėdos pasisukimo grafikas. Inkarinis varžtas yra 24 mm skersmens, plokštė – 20 mm storio

Fig. 14. Diagram of column base rotation: anchor bolt diameter – 24 mm, base plate – 20 mm

Išvados

1. Sumodeliuotos kolonos pėdos skaitiniu metodu analizės ir analitinio metodo pagal Eurokodą palyginimas parodė, kad poslinkiai (kol nėra pasiekta ribinio lenkimo momento pagal eurokodą) yra didesni skaičiuojant skaitiniu metodu. Didžiausias skirtumas pasiekiamas, kada apkrova siekia apie trečdalį lenkimosios galios pagal apskaičiuotą eurokode. Pats didžiausias skirtumas siekia 73,7 %, o mažiausias – 61,6 %.
2. Mažiausias skirtumas tarp kolonos pėdos kampinių poslinkių skaičiuojant baigtinių elementų metodu ir Euro kodu 3 yra tada, kada veikiantis lenkimo momentas pasiekia lenkimo galią pagal Eurokodą. Tada didžiausias skirtumas 28,0 %, o mažiausias 2,8 %.

3. Kolonos pėdų lenkiamosios galios skaičiavimai parodė, kad rezultatas gautas konservatyviu būdu. Visais atvejais baigtinių elementų metodu skaičiuojant lenkiamąją galią gauta atsarga lyginta su apskaičiuota Eurokode. Didžiausias skirtumas 49,0 %, o mažiausias 37,0 %.
4. Kolonos pėdų skaičiavimo rezultatai rodo, kad skaitiniu metodu skaičiuojant lenkiamąją galią gaunama atsarga lyginama su Eurokodu. Skaitiniu metodu apskaičiuoti kampiniai posūkiai yra didesni už Eurokodu 3 apskaičiuotus, kol pasiekiamą lenkiamąją galią pagal Eurokodą 3. Paskui matyti, kad didesni kampiniai posūkiai gaunami skaitiniu metodu.

in the thickness of the base plate; the second one shows a different diameter of the anchor bolt. The obtained results reveal the influence of the base plate and anchor bolt on the stiffness of column base connection. The article discusses differences in the euro code and linear analysis: minimum difference makes 61,6% and maximum – 73,7%. For calculating the strength of the column base, a conservative model has been employed, i.e. according to the Eurocode, the received values are smaller compared to nonlinear analysis: minimum difference makes 37,0% and maximum – 49,0%.

Keywords: semi rigid joints, column base, numerical modelling, nonlinear analysis.

Literatūra

- Azzam, D. M., *et al.* 2008. Numerical study of stiffened socketed connections for highway signs, traffic signals, and luminaire structures, *Journal of Structural Engineering* 134(2): 173–180.
[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2008\)134:2\(173\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:2(173))
- Ceb-Fib Model Code 1990. Design code. London, 1998. 437 p.
- Eroz, M., *et al.* 2008. Direct analysis and design of steel frames accounting for partially restrained column base conditions, *Journal of Structural Engineering* 134(9): 1508–1516.
[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2008\)134:9\(1508\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:9(1508))
- Faella, C.; Piluso, V.; Rizzano, G. 2000. Structural Steel in Semi Rigid Connections: Theory, Design and Software. Boca Raton: CRC. 505 p.
- LST EN 1992-1-1:2005. Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1–1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės. Vilnius, 2007. 232 p.
- LST EN 1993-1-8+AC. Eurokodas 3. Plieninių konstrukcijų projektavimas. 1–8 dalis: Mazgų projektavimas. Vilnius, 2005. 134 p.
- Picard, A; Beaulieu, P. D. 1984. Behaviour of simple column base connections, *Can. J. Civil. Eng.* 12: 126–136.
<http://dx.doi.org/10.1139/l85-013>
- Vandegans, D. 1997. Column Bases: Eksperimentation and Application of Analytical Model. Brussels: Research Centre of the Belgian Metalworking Industry. 80 p.
- Wald, F., *et al.* 1995. Column Base Semi – Rigid Behaviour. Praha: Czech Technical University.

MODELLING COLUMN BASES OF SEMI-RIGID STEEL FRAMES: STIFFNESS AND STRENGTH CALCULATION

Ž. Bučmys, R. Dališanskis

Abstract

The paper examines the models and stiffness efficiency of the column base of semi-rigid steel frames, reviews stiffness calculation methods and calculates the rotation of column base connection in two ways: analytical, according to LST EN 1993-1-8, and finite element, applying nonlinear analysis. Two groups of modelling have been made: the first group deals with changes