



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS

Vytautas Dagilis

**SEISMINIO POVEIKIO VEIKIAMO BOKŠTO PAGAL
EUROKODĄ TYRIMAI**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Dr. Nerijus Adamukaitis

KAUNAS, 2015



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS
STATYBINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(parašas) Doc. dr. Mindaugas Augonis

(data)

**SEISMINIO POVEIKIO VEIKIAMO BOKŠTO PAGAL
EUROKODĄ TYRIMAI**

Baigiamasis magistro projektas

Statybos inžinerija (kodas 621H20001)

Vadovas

(parašas) Dr. Nerijus Adamukaitis

(data)

Recenzentas

(parašas)

(data)

Projektą atliko

(parašas) Vytautas Dagilis

(data)

KAUNAS, 2015

**PARENGTO BAIGIAMOJO PROJEKTO
SAVARANKIŠKUMO
PATVIRTINIMAS**

Patvirtinu, kad parengtas magistro baigiamasis darbas

(įrašyti pavadinimą)

- atliktas savarankiškai ir nebuvo kaip visuma pateiktas jokiam dėstomajam dalykui atsiskaityti šiame ar ankstesniuose semestruose;
- nebuvo pateiktas atsiskaityti kitame KTU fakultete arba kitoje Lietuvos aukštojoje mokykloje;
- turi visas į baigiamojo darbo literatūros sąrašą įtrauktą informacijos šaltinių nuorodas.

(vardas ir pavardė)

(parašas)

Data

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS
STATYBINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

Baigiamasis magistro projektas
SEISMINIO POVEIKIO VEIKIAMO BOKŠTO PAGAL EUROKODĄ TYRIMAI

Vytautas Dagilis

Anotacija (iki 150 žodžių)

Baigiamojo magistro projekto tikslas – ištirti seisminį poveikį bokšto konstrukcijoms. Atlikti konstrukcijų analizę modeliuojant bokšto konstrukciją be ryšių ir palyginti tą pačią konstrukciją suvaržant ryšiais. Skaičiavimams naudojama metalinės konstrukcijos, kurios susideda iš HEB300 kolonų ir bokšto viršuje standžiai sujungtų sijų iš HEB700 profilio.

Pirmoje darbo dalyje apžvelgiama pagrindinės konstrukcijų virpesių idėjos, Eurokodo reikalavimai ir rekomendacijos projektuojant statinius seisminėse zonose. Parinkus preliminarius konstrukcijos ir rezervuaro parametrus, apskaičiuojama svyravimo periodai skirtingomis kryptimis tam, kad būtų galima susidaryti tampriosios reakcijos spektrus bei atlikti kitus skaičiavimus susijusius su konstrukcijos virpesiais.

Modeliuojami trys skirtingi bokšto modeliai – be ryšių ir su dviejų tipų ryšiais. Bokštas be ryšių skirtas gautų rezultatų palyginimui skaičiuojant pagal normatyvus, o ryšiai kitiems modeliams įvedami norint nustatyti kokią realią įtaką jie turi bokštui ir kaip tai įtakos rezultatus.

Reikšminiai žodžiai

Eurokodas, seisminė analizė, virpesiai, bokštas.

KAUNAS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE
DEPARTMENT OF BUILDING STRUCTURES

Final master project
RESEARCH OF TOWER LOADED BY SEISMIC ACTION
Vytautas Dagilis

Summary

The aim of this final master project – to investigate the seismic impact on the tower structure. Perform structural analysis simulation of the tower structure without bracing and compare it to the same structure with bracing. For calculations metal members of the structure are used, which consists of HEB300 profile columns and rigidly connected HEB700 beams at the top of the tower.

The first part reviews the main ideas of structural vibrations, the requirements of Eurocode and recommendations for the design of buildings in seismic zones. After selecting preliminary parameters of structure, the periods of vibrations are calculated in different directions in order to form elastic response spectra and perform other calculations related to vibrations of structure.

Three models of the tower are generated – one without bracing and two with different types of bracing. Tower without bracing is designed in order to compare results with calculations according Eurocode, meanwhile bracing for other models are selected to determine what actual impact they have on tower and how it would affect the results.

Keywords

Eurocode, seismic analysis, vibrations, tower.

TURINYS

| | |
|---|----|
| PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS..... | 7 |
| LENTELIŲ SĄRAŠAS..... | 9 |
| ĮVADAS..... | 10 |
| 1. LITERATŪROS ANALIZĖ..... | 11 |
| 1.1. Konstrukcijų virpesiai..... | 11 |
| 1.2. Seisminis poveikis pagal Eurokodo 8 dalį..... | 12 |
| 2. SKAIČIAVIMAI PAGAL NORMAS..... | 24 |
| 2.1. Preliminarūs duomenys skaičiavimams..... | 24 |
| 2.2. Svyravimo periodų apskaičiavimas..... | 25 |
| 2.3. Tamprieji reakcijos spektrai pagal ir šoninės jėgos analizė pagal EC8..... | 26 |
| 3. SKAIČIAVIMAI PROGRAMA SOFiSTiK..... | 32 |
| 3.1. Bokšto geometrija, konstrukcijos ir apkrovos..... | 32 |
| 3.2. Seisminė analizė..... | 33 |
| 3.3. Bokšto konstrukcija be ryšių..... | 36 |
| 3.4. Bokšto konstrukcija su X formos ryšiais..... | 38 |
| 3.5. Bokšto konstrukcija su V formos ryšiais..... | 40 |
| 4. REZULTATŲ ANALIZĖ..... | 42 |
| 4.1. Skaičiavimų rezultatai..... | 42 |
| 4.2. Grafinis rezultatų palyginimas..... | 42 |
| 4.3. Išvados..... | 45 |
| LITERATŪRA..... | 46 |

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

| | |
|--|----|
| 1.2.1 pav. Slopinimo santykis žemės paviršiaus pagreičiui..... | 16 |
| 1.2.2 pav. Paprasčiausia tampriojo atsako spektro taikomo Eurokode forma | 17 |
| 1.2.3 pav. Rekomenduojamas spektrinės formos 1 ir 2 tipų seisminiams poveikiams..... | 19 |
| 1.2.4 pav. Rekomenduojamos spektrinės formos 1 tipo seisminiam poveikiui pagal grunto tipą | 19 |
| 1.2.5 pav. Rekomenduojamos spektrinės formos 2 tipo seisminiam poveikiui pagal grunto tipą | 20 |
| 1.2.6 pav. Rekomenduojamas spektrinės formos vertikaliesiems tampriesiems spektrams | 21 |
| 1.2.7 pav. Rekomenduojamas poslinkių grafikas 1 seisminiam tipui pagal gruntų tipą | 22 |
| 2.3.1 pav. Tampriosios pagreičio reakcijos spektras | 28 |
| 3.1.1 pav. Bokšto geometrija | 32 |
| 3.1.2 pav. Apkrovos veikiančios bokšto konstrukciją | 32 |
| 3.2.1 pav. Skaičiavimų programoje medis..... | 33 |
| 3.2.2 pav. Virpesių modų generavimas | 33 |
| 3.2.3 pav. Virpesių slopinimas | 34 |
| 3.2.4 pav. Apkrovų konvertavimas į mases | 34 |
| 3.2.5 pav. Apkrovų veikimo krypties nustatymas | 35 |
| 3.2.6 pav. Atsako spektro apibrėžimas | 35 |
| 3.3.1 pav. Svyravimo modų charakteristikos | 36 |
| 3.3.2 pav. Pirmoji moda (x kryptis) ir trečioji moda (y kryptis) | 36 |
| 3.3.3. pav. Konstrukcijos poslinkiai x ir y kryptimis atitinkamų modų atvejais | 37 |
| 3.3.4 pav. Konstrukcijos lenkimo momentai x ir y kryptimis atitinkamų modų atvejais | 37 |
| 3.4.1 pav. Svyravimo modų charakteristikos bokštui su X formos ryšiais | 38 |
| 3.4.2 pav. Pirmoji moda (x kryptis) ir antroji moda (y kryptis) – 3D vaizdas | 38 |
| 3.4.3 pav. Pirmoji moda (x kryptis) ir antroji moda (y kryptis) – vaizdas iš viršaus | 39 |
| 3.4.4 pav. Konstrukcijos poslinkiai x ir y kryptimis atitinkamų modų atvejais | 39 |
| 3.4.5 pav. Konstrukcijos maksimalūs lenkimo momentai x ir y kryptimis | 39 |
| 3.5.1 pav. Svyravimo modų charakteristikos bokštui su V formos ryšiais | 40 |

| | |
|---|----|
| 3.5.2 pav. Pirmoji moda (x kryptis) ir antroji moda (y kryptis) – 3D vaizdas | 40 |
| 3.5.3 pav. Pirmoji moda (x kryptis) ir antroji moda (y kryptis) – vaizdas iš viršaus | 41 |
| 3.5.4 pav. Konstrukcijos poslinkiai x ir y kryptimis atitinkamų modų atvejais | 41 |
| 3.5.5 pav. Konstrukcijos maksimalūs lenkimo momentai x ir y kryptimis | 41 |
| 4.2.1 pav. Svyravimo periodų palyginimas | 43 |
| 4.2.2 pav. Bokšto viršaus poslinkių palyginimas | 44 |
| 4.2.3 pav. Bokšto lenkimo momentų ties pagrindu palyginimas | 44 |

LENTELIŲ SĄRAŠAS

| | |
|---|----|
| 1.2.1 lentelė. Svarbumo nustatymas pagal pastato tipą | 14 |
| 1.2.2 lentelė. Grunto tipo parametrai | 14 |
| 1.2.3 lentelė. Rekomenduojamos 1 tipo tampriosios reakcijos spektro parametrų reikšmės | 18 |
| 1.2.4 lentelė. Rekomenduojamos 2 tipo tampriosios reakcijos spektro parametrų reikšmės | 18 |
| 1.2.5 lentelė. Rekomenduojamos parametrų vertės | 21 |
| 2.3.1 lentelė. Svarbumo klasės pagal pastato tipus ir svarbumo koeficiento parinkimas | 26 |
| 2.3.2 lentelė. Grunto tipo parinkimas | 27 |
| 2.3.3 lentelė. Rekomenduojamos 2 tipo tampriosios reakcijos spektro parametrų reikšmės | 27 |
| 4.1.1 lentelė. Rezultatų suvestinė | 42 |
| 4.2.1 lentelė. Bokšto konstrukcijų svyravimo periodai x ašies kryptimi | 42 |
| 4.2.2 lentelė. Bokšto konstrukcijų svyravimo periodai y ašies kryptimi | 42 |
| 4.2.3 lentelė. Bokšto viršaus poslinkiai x ašies kryptimi | 43 |
| 4.2.4 lentelė. Bokšto viršaus poslinkiai y ašies kryptimi | 43 |
| 4.2.5 lentelė. Bokšto kolonų pagrindus veikiantys lenkimo momentai x ašies kryptimi | 44 |
| 4.2.6 lentelė. Bokšto kolonų pagrindus veikiantys lenkimo momentai y ašies kryptimi | 44 |

IVADAS

Bet kokio pastato konstrukcijas veikia nuolatinės bei kintamos apkrovos, pagal kurias yra projektuojamos pastato laikančiosios konstrukcijos. Tačiau pastato eksploatacijos metu gali atsirasti trumpalaikės apkrovos – seisminiai virpesiai, kurie gali sukelti nenumatytas konstrukcijos deformacijas ar griūtį.

Darbo objektas – bokštas, veikiamas seisminės apkrovos.

Darbo tikslas – ištirti seisminį poveikį bokšto konstrukcijoms. Atlikti konstrukcijų analizę modeliuojant bokšto konstrukciją be ryšių ir palyginti tą pačią konstrukciją suvaržant ryšiais.

Pirmoje darbo dalyje apžvelgiama pagrindinės konstrukcijų virpesių idėjos, Eurokodo reikalavimai ir rekomendacijos projektuojant statinius seisminėse zonose.

Parinkus preliminarinius konstrukcijos ir rezervuaro parametrus, apskaičiuojama svyravimo periodai skirtingomis kryptimis tam, kad būtų galima susidaryti tampriosios reakcijos spektrus bei atlikti kitus skaičiavimus susijusius su konstrukcijos virpesiais. Galiausiai pagal Eurokodo metodiką apskaičiuojama veikianti šoninė jėga bei atsirandantis didžiausias lenkimo momentas.

Modeliuojami trys skirtingi bokšto modeliai – be ryšių ir su dviejų tipų ryšiais. Bokštas be ryšių skirtas gautų rezultatų palyginimui skaičiuojant pagal normatyvus, o ryšiai kitiems modeliams įvedami norint nustatyti kokią realią įtaką jie turi bokštui ir kaip tai įtakos rezultatus. Darbo pabaigoje apibendrinami gauti rezultatai, gauti analizuojant skirtingus modelius.

Baigiamojo magistro projekto uždaviniai:

1. Remiantis Eurokodu ir apžvelgta literatūra, įvertinti seisminio poveikio įtaką plieninio bokšto konstrukcijoms.
2. Apskaičiuoti sudaryto bokšto konstrukcijų savąjį svyravimo periodą ir pagal metodikas apskaičiuoti papildomas apkrovas atsirandančias dėl seisminio poveikio.
3. Kompiuterine programa apskaičiuoti seisminio poveikio įtaką bokštui esant skirtingoms ryšių sistemoms.
4. Palyginti gautus rezultatus

1. LITERATŪROS ANALIZĖ

1.1. Konstrukcijų virpesiai [1]

Konstrukcija pradeda virpėti kai ją, esančią pusiausvyros padėtyje, kas nors pastumia arba patraukia į šalį. Pastumia – tai reiškia suteikia greitį, o patraukia – lėtai išveda konstrukciją iš buvusios pusiausvyros. Virpesiai vadinami laisvais jei taip paveiktą konstrukciją toliau nebeveikia jokios pašalinės arba išorinės jėgos. Lieka tik viena, pati svarbiausia, pagrindinė jėga, be kurios virpesių nebūtų – atstatomoji. Ši jėga stengiasi grąžinti iš pusiausvyros išvestą konstrukciją atgal į pusiausvyros padėtį. Jos nelaikome pašaline išorine jėga. Dažniausiai, bet ne visada, atstatomoji jėga priklauso tik nuo atstumo ir toki priklausomybė yra tiesinė:

$$F_x = -k \cdot u \quad (1.1.1)$$

čia: F_x – grąžinančiosios (atstojamosios) jėgos projekcija į x ašį
 u – virpančio kūno poslinkio projekcija į tą pačią ašį
 k – standumas

Minusas lygybėje parodo priešingas minėtų projekcijų kryptis.

Atstatomoji jėga taip pat gali būti netiesinė:

$$F_x = -k \cdot u^2 \quad (1.1.2)$$

Tačiau realybėje virpesiai dažniausiai būna tiesiniai ar artimi jiems.

Remiantis Niutono dėsniumi, jėga lygi kūno masės ir pagreičio sandaugai:

$$F_x = m \cdot \ddot{u} \quad (1.1.3)$$

čia m – kūno masė, kg
 \ddot{u} – pagreitis, m/s^2

Įrašę 1.1.3 lygtį į 1.1.1 gauname laisvųjų virpesių diferencialinę lygtį:

$$m \cdot \ddot{u} + k \cdot u = 0 \quad (1.1.4)$$

1.1.4 lygtį galima išreikšti taip:

$$\ddot{u} + \omega_0 u = 0 \quad (1.1.5)$$

čia $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ – savasis kampinis dažnis, [rad/s]

Diferencialinė lygtis 1.1.5 turi du nepriklausomus sprendinius $\sin \omega_0 t$ ir $\cos \omega_0 t$, todėl bendrasis sprendinys bus:

$$u = A \cos \omega_0 t + B \sin \omega_0 t \quad (1.1.6)$$

čia A ir B – bet kokie skaičiai, konstantos. Vietoje jų įrašius $A = b \sin \alpha$ ir $B = b \cos \alpha$ gausime:

$$u = b \sin(\omega_0 t + \alpha) \quad (1.1.7)$$

Poslinkio kitimas išreiškiamas trigonometrinėmis periodinėmis funkcijomis, kurių periodas 2π . Jei laiką, kuriam praėjus judesys kartojasi, pažymėsime τ_0 , tai gausime $2\pi = \omega_0 \tau_0$, todėl virpesių periodas:

$$\tau_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{1}{f_0} \quad (1.1.8)$$

Virpesių periodui atvirkščias dydis vadinamas savuoju dažniu f_0 , kuris iš 1.1.8 formulės lygus:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1.1.9)$$

1.2. Seisminis poveikis pagal Eurokodo 8 dalį

Eurokodas 8 taikomas pastatų, kurie eksploatuojami seisminio aktyvumo regionuose, projektavimui. Jo pagrindinis tikslas yra užtikrinti, kad žemės drebėjimų metu:

- žmonių gyvybės būtų apsaugotos;
- žala pastatui būtų minimali arba jos visai nebūtų;
- pastatai, svarbūs civilių apsaugai išliktų veikiantys.

Pagrindiniai reikalavimai

- Nesugriuvimo reikalavimas

Statinys turėtų būti suprojektuotas ir pastatytas taip, kad nepasireikštų lokalinis ar visiškas sugriuvimas ir kad pastatas išlaikytų savo konstrukcinį vientisumą po seisminio poveikio.

- Pažaidos apribojimo reikalavimas

Statinys turėtų būti suprojektuotas ir pastatytas taip, kad atlaikytų didesnės atsiradimo tikimybės seisminį poveikį, be pažeidimų, kurie atneštų proporcingai didesnius nuostolius negu statinio kaina.

Pirmasis reikalavimas yra siejamas su gyvybės apsaugojimu, apsaugant pastatą nuo globalios ir lokalsios griūties, o po įvykio pastatas turėtų išlaikyti savo vientisumą ir konstrukcijų stiprumą. Po įvykio pastatas gali būti patyręs esminės žalos, įskaitant negrižtamus poslinkius, bet žmonės turėtų

galėti saugiai evakuotis drebėjimo metu ar per pakartotinius žemės drebėjimus. Kalbant apie Eurokodus, kurie naudoja ribinių būvių koncepciją, šis reikalavimas turėtų būti siejamas su saugos ribiniu būviu, nes jis apibrėžia žmonių ir pastato apsaugojimą.

Antrasis reikalavimas susijęs su ekonominių nuostolių sumažinimu tiek konstrukcinės, tiek nekonstrukcinės žalos atveju. Šių įvykių metu, pastatas neturėtų turėti ilgalaikių deformacijų ir jo elementai turėtų išlaikyti savo stiprumą ir standumą, dėl ko neturėtų prireikti konstrukcinio remonto. Žala nekonstrukciniams elementams gali būti leistina jei ji nesukelia ypatingų nepatogumų ir gali būti lengvai sutvarkyta. Eurokodų rėmuose, šis reikalavimas yra siejamas su tinkamumo ribiniu būviu, nes apibrėžia pastato naudojimą, naudotojų komfortą ir ekonominius nuostolius.

Šiems projektavimo būdams taikomi Eurokodo rekomenduojami dydžiai, kurie gaunami pagal formulę:

$$T_R = \frac{1}{\nu} = \frac{-T_L}{\ln(1 - P)} \quad (1.2.1)$$

čia T_R – vidutinis pasikartojimo laikotarpis

T_L – laikotarpis, pagal kurį numatomas pasikartojimas

P – viršinimo tikimybė

Nesugriuvimo reikalavimui – viršinimo tikimybė $P = 10\%$ per $T_L = 50$ metų, gaunamas laikotarpis $T_R = 475$ metai.

Pažaidos apribojimo reikalavimui – viršinimo tikimybė $P = 10\%$ per $T_L = 10$ metų, gaunamas laikotarpis $T_R = 95$ metai.

Pažaidos apribojimas dažnai minimas kaip tinkamumo seisminis būvis.

Patikimumo skirstymas

Minėti projektavimo būdai yra taikomi įprastiems pastatams ir į skaitomi kaip atskaitiniai (pagal atskaitinį žemės paviršiaus pagreičio dydį a_{gR}). Tačiau Eurokodas numato galimybę skirstyti pastatų patikimumą įvairiems pastatams ar konstrukcijoms, priklausomai nuo svarbuvo ir pasekmių griūties ar suirimo atveju.

Naudojamas svarbumo koeficientas γ_I , kuris priskiriamas pagal svarbuvo klasę. Šis skirstymas pateikiamas 1.2.1 lentelėje.

1.2.1 lentelė. Svarbumo nustatymas pagal pastato tipą [2]

| Svarbumo klasė | Pastato tipas | Svarbumo koeficientas γ_I |
|----------------|--|----------------------------------|
| I | Mažo svarbumo pastatai, pvz. ūkiniai pastatai ir kt. | 0,8 |
| II | Įprasti pastatai, nepriklausantys kitoms kategorijoms | 1,0 |
| III | Pastatai, kurių seisminis atsparumas yra svarbus lyginant su pasekmėmis griuvimo metu, pvz. mokyklos, susirinkimo vietos, kultūrinės patalpos ir kt. | 1,2 |
| IV | Pastatai, kurių vientisumas per žemės drebėjimus yra labai svarbus, pvz. ligoninės, ugniagesių stotys, elektros jėgainės ir kt. | 1,4 |

Dėl skirtingų svarbumo klasių, skaičiuojamasis žemės paviršiaus pagreitis a_g yra lygus:

$$a_g = a_{gR} \cdot \gamma_I \quad (1.2.2)$$

Grunto sąlygos

Žemės drebėjimo įtaka grunto paviršiuje labai priklauso nuo grunto sandaros. Pagal Eurokodą nurodoma, kad, dėl šios priežasties, statant pastatą seisminėje zonoje būtina atlikti grunto tyrimus.

Grunto tyrimai turi du pagrindinius uždavinius:

- Leisti klasifikuoti grunto pobūdį, kad būtų galima parinkti virpesių spektrą;
- Identifikuoti grunto veikimą per žemės drebėjimą, žalingą pastato atsakui.

Dėl antrojo aspekto, statybos aikštelė ir grunto prigimtis turėtų nekelti grėsmės grunto pleišėjimui, šlaitų nestabilumui ir nuosėdžiams sukeltiems grunto suskystėjimo arba sutankėjimo žemės drebėjimo metu. Jeigu tyrimai rodo, kad tokios rizikos egzistuoja, reikia imtis priemonių, kad išvengtų neigiamų pasekmių arba statybos vieta turėtų būtų perkelta.

Pirmajam efektui, Eurokodas pateikia grunto klasifikavimo grupes, kurios parodytos 1.2.2 lentelėje.

1.2.2 lentelė. Grunto tipo parametrai [2]

| Grunto tipas | Grunto apibūdinimas | Parametrai | | |
|----------------|--|------------|-----------|--------|
| | | $v_{s,30}$ | N_{SPT} | c_u |
| A | Akmenys ir kiti dariniai panašūs į akmenis | >800 | | |
| B | Tankaus smėlio telkiniai, žvyras arba tvirtas molis, mažiausiai kelių dešimčių metrų storio, apibūdinamas palaipsniui grunto mechaninių savybių didėjimu gilėjant | 360-800 | >50 | >250 |
| C | Gilūs tankaus arba vidutiniškai tankaus smėlio, žvyro ar tvirto molio, nuo kelių dešimčių iki šimtų metrų storio | 180-360 | 15-50 | 70-250 |
| D | Mažai koheziško molio ar daugiausia minkšto molio gruntas. | <180 | <15 | <70 |
| E | Gruntas, kurį sudaro paviršinis aliuvinis sluoksnis su C ir D gruntų v_s reikšmėmis ir grunto 5-20 m grunto storio, po kuriuo būtų grunto sluoksnis, kurio $v_s > 800 \text{ m/s}$ | | | |
| S ₁ | Sanklodos, kuriose yra mažiausiai 10 m storio minkšto molio/nuosėdų su dideliu plastiškumu (PI>40) ir dideliu vandens kiekiu | <100 | - | 10-20 |
| S ₂ | Skystas, minkštas ir kitas gruntas nepaminėtas kituose tipuose | | | |

Vidutinis skersinės bangos greitis $v_{s,30}$ yra pagrindinis parametras parenkant grunto tipą. Jis turėtų būti naudojamas bet kada kai įmanoma ir jos vertė turėtų būti paskaičiuota remiantis pagal šią išraišką:

$$v_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{v_i}} \quad (1.2.3)$$

čia h_i – grunto sluoksnio storis

v_i – skersinės bangos greitis

N – gruntų sluoksnių skaičius viršutiniuose 30 m

Kai tiksli informacija apie skersinių bangų greičius neturima, parametrai gali būti parenkami iš 1.2.2 lentelės pagal grunto tipą.

Grunto tipai nuo A iki D būna nuo akmenų iki akmeningų darinių nesankibių gruntų ar minkštų sankibių gruntų. Grunto tipas E iš esmės charakterizuojamas staigiu standumo kontrastu tarp paviršinio (minkšto) sluoksnio (nuo 5 iki 20 m storio) ir po juo esančio daug standesniu sluoksniu.

Du papildomi gruntų tipai S_1 ir S_2 yra pridėti prie 1.2.2 lentelės. Vietovėms, tenkinančioms vieną iš šių tipų, turi būti atlikti specialūs tyrimai, kad apibūdinti seisminį poveikį.

Šiems tipams, o ypač S_2 , turi būti įvertinta grunto neatlaikymo galimybė. Pabrėžtina, kad grunto suskystėjimas dažniausiai priveda prie pastato, stovinčio ant tokio grunto, griūties. Tokiu atveju gruntas praranda savo laikomąją galią ir sukelia bet kokių pamatų, kurie rėmėsi ant to grunto, suirimą.

Taip pat reikėtų atkreipti dėmesį į S_1 grunto tipą. Šie gruntai dažniausiai pasižymi žemomis v_s reikšmėmis, žemu vidiniu slopinimu ir neįprastai iškreiptomis tiesinėmis savybėmis ir dėl to gali iškreipti grunto ir statinio sąveiką. Šiuo atveju reikia išsiaiškinti grunto seisminį poveikį, tam kad gauti virpesių spektro priklausomybę nuo grunto storio ir v_s vertės bei kontrasto tarp skirtingų sluoksnių.

Seisminis poveikis

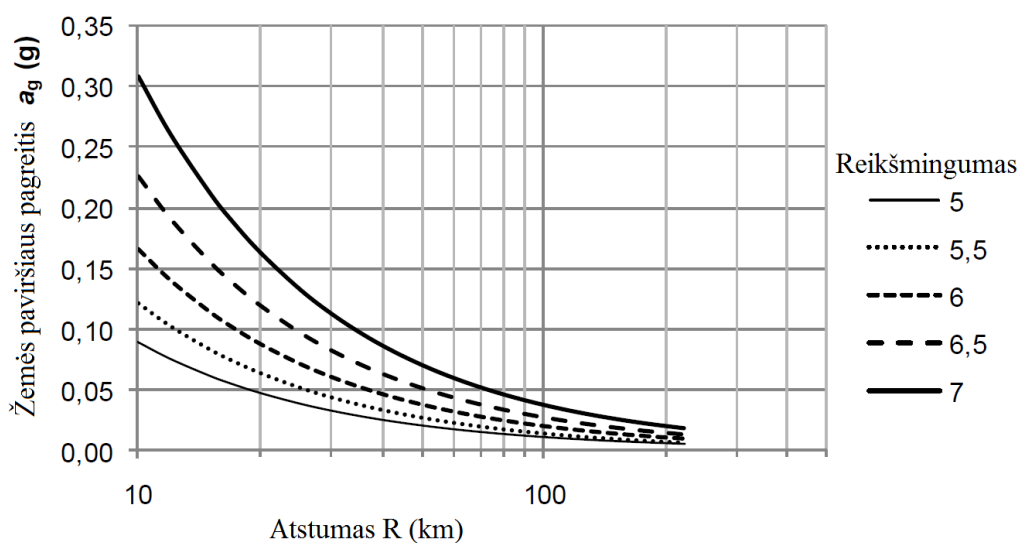
Seisminis poveikis skaičiavimams turi būti vertinamas ne pagal žemės poveikio vertinimą numatant į ateitį, o pagal pavojingumo vertinimą. Seisminis pavojus dažniausiai pateikiamas pavojingumo kreivėmis, kurios vaizduoja kiekvieno seisminio parametro viršinimo tikimybę tam tikro poveikio metu, tam tikroje vietoje (dažniausiai priimant akmeningą vietovę).

Priimta, kad žemės paviršiaus judėjimo parametrai nėra tinkami parametrai įvertinti žemės drebėjimo pavojingumą ir jo galimas pasekmes konstrukcijoms. Seisminiam pavojingumui įvertinti naudojama spektrinės ordinatės. Nepaisant to, paprastumo labui, Eurokode seisminis pavojus vertinamas tik žemės paviršiaus pagreičiu (a_{gR}) A tipo grunte.

Kiekvienai valstybei, seisminis pavojus yra apibrėžtas zonų žemėlapiu, pateikiamu nacionalinėse institucijose. Dėl to, teritorijos turi būti sudalintos į seismines zonas, priklausomai nuo vietinio pavojaus. Iš esmės, pavojus kiekvienoje zonoje yra priimtas kaip konstanta, t.y. žemės paviršiaus pagreitis yra konstanta.

Žemės paviršiaus pagreitis (a_{gR}), kiekvienai seisminei zonai, atitinka vidutinį pasikartojimo periodą T_{NCR} , parenkamą nacionalinių institucijų seisminėms zonoms pagal nesugriuvimo reikalavimą. Kaip minėta ankščiau, rekomenduotina vertė yra $T_{NCR} = 475$ metai.

Pavojaus žemėlapiai yra gauti iš susilpnėjimo santykių kurie apibūdina žemės paviršiaus judėjimo variaciją reikšmingumu (M) ir atstumu (R) nuo šaltinio. Šiam ryšiui iliustruoti N. Ambraseys 1996 metais pateikė grafiką (1.2.1 pav.), kuris vaizduoja žemės paviršiaus pagreičio silpnėjimą, priklausomai nuo atstumo ir reikšmingumo.



1.2.1 pav. Slopinimo santykis žemės paviršiaus pagreičiui

Iš grafiko matyti, kad žemės paviršiaus pagreitis didėja su reikšmingumu ir smarkiai mažėja didėjant atstumui.

Žemės paviršiaus pagreičio susilpnėjimas pateikiamas tokia formule:

$$\log a_g = -1,48 + 0,27 \cdot M - 0,92 \log R \quad (1.2.4)$$

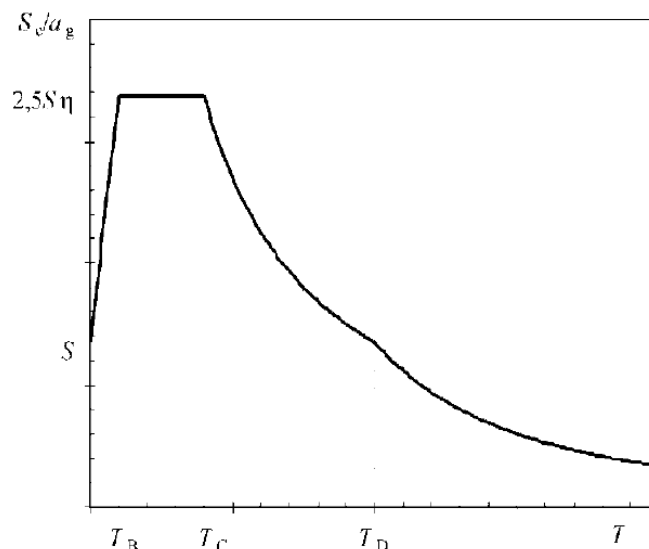
čia M – reikšmingumas

R – atstumas nuo epicentro, km

Lygtis leistina, kai tenkinamos sąlygos $4 < M < 7,3$ ir $3 \text{ km} < R < 200 \text{ km}$

Horizontalus tamprusis spektras

Žemės judėjimas, Eurokode apibūdinamas tampriuoju žemės pagreičio atsako spektru S_e , vadinamas „tampriuoju atsako spektru“, kuris pateikiamas 1.2.2 pav.



1.2.2 pav. Paprasčiausia tampriojo atsako spektro taikomo Eurokode forma

Grafiką sudaro kreivė iš keturių dalių:

1. Mažo periodo, nuo žemės pagreičio piko iki konstantos.
2. Nekintantis pagreitis.
3. Nekintantis greitis.
4. Nekintantys poslinkiai.

Šias dalis skiria trys periodai T_B , T_C , T_D , kurie yra nustatyti nacionalinių institucijų (Nationally Determined Parameters – NDP) ir leidžia pritaikyti grafiko formą pagal kiekvienos šalies specifiką.

Šis grafikas gaunamas pagal tokias išraiškas:

$$0 \leq T \leq T_B: S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2,5 - 1) \right] \quad (1.2.5)$$

$$T_B \leq T \leq T_C: S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \quad (1.2.6)$$

$$T_C \leq T \leq T_D: S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \left[\frac{T_C}{T} \right] \quad (1.2.7)$$

$$T_D \leq T \leq 4s: S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \left[\frac{T_C T_D}{T} \right] \quad (1.2.8)$$

čia $S_e(T)$ – tampriosios reakcijos spektras

a_g – A tipo grunto skaičiuotinis pagreitis

T_B – pastovaus spektrinio pagreičio atšakos periodo apatinė riba

T_C – pastovaus spektrinio pagreičio atšakos periodo apatinė riba

T_D – pastovaus poslinkio reakcijos intervalo spektre pradžios reikšmė

S – grunto koeficientas

η – pataisos dėl slopinimo koeficientas, kurio 5% klampiojo slopinimo standartinė reikšmė $\eta = 1$

1.2.3 lentelė. Rekomenduojamos 1 tipo tampriosios reakcijos spektro parametrų reikšmės [2]

| Grunto tipas | S | $T_B(s)$ | $T_C(s)$ | $T_D(s)$ |
|--------------|------|----------|----------|----------|
| A | 1,0 | 0,15 | 0,4 | 2,0 |
| B | 1,2 | 0,15 | 0,5 | 2,0 |
| C | 1,15 | 0,20 | 0,6 | 2,0 |
| D | 1,35 | 0,20 | 0,8 | 2,0 |
| E | 1,4 | 0,15 | 0,5 | 2,0 |

1.2.4 lentelė. Rekomenduojamos 2 tipo tampriosios reakcijos spektro parametrų reikšmės [2]

| Grunto tipas | S | $T_B(s)$ | $T_C(s)$ | $T_D(s)$ |
|--------------|------|----------|----------|----------|
| A | 1,0 | 0,05 | 0,25 | 1,2 |
| B | 1,35 | 0,05 | 0,25 | 1,2 |
| C | 1,5 | 0,10 | 0,25 | 1,2 |
| D | 1,8 | 0,10 | 0,30 | 1,2 |
| E | 1,6 | 0,05 | 0,25 | 1,2 |

Pataisos dėl slopinimo koeficientas η gali būti išreiškiamas lygtimi:

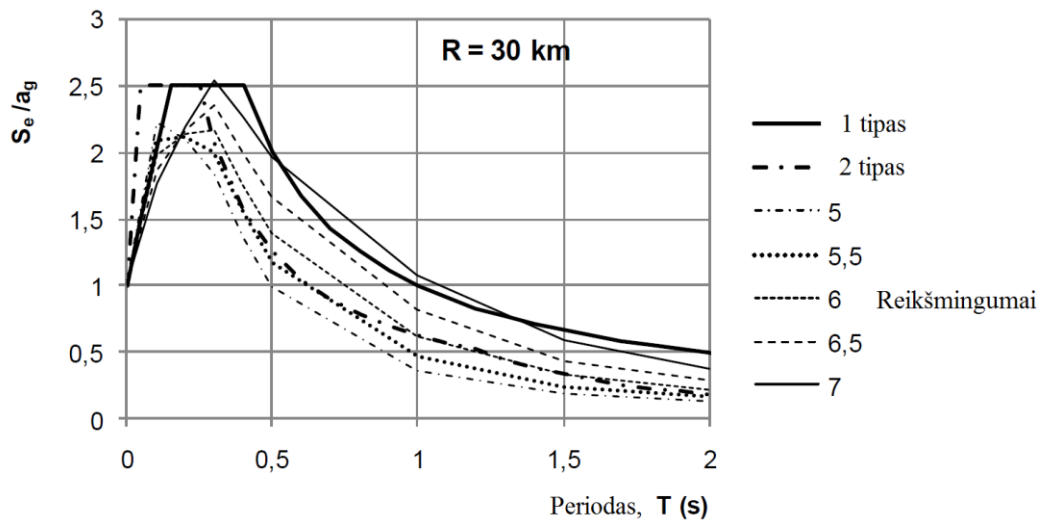
$$\eta = \sqrt{10/(5 + \xi)} \geq 0,55 \quad (1.2.9)$$

čia ξ – klampusis slopinimas, %

Kad nacionalinės institucijos turėtų didesnę pasirinkimą, Eurokodas numato spektrus dviem žemės drebėjimų tipams: 1 tipui ir 2 tipui.

Iš pagrindo, pirmiausiai turėtų būti naudojamas 1 tipas. Tačiau jeigu žemės drebėjimai, kurie kelia didžiausią pavojų turi reikšmingumą M_S ne didesnę nei 5,5, tai 2 tipas yra rekomenduojamas.

Rekomenduojami spektriniai grafikai šiems tipams yra pateikiami 1.2.3 pav.

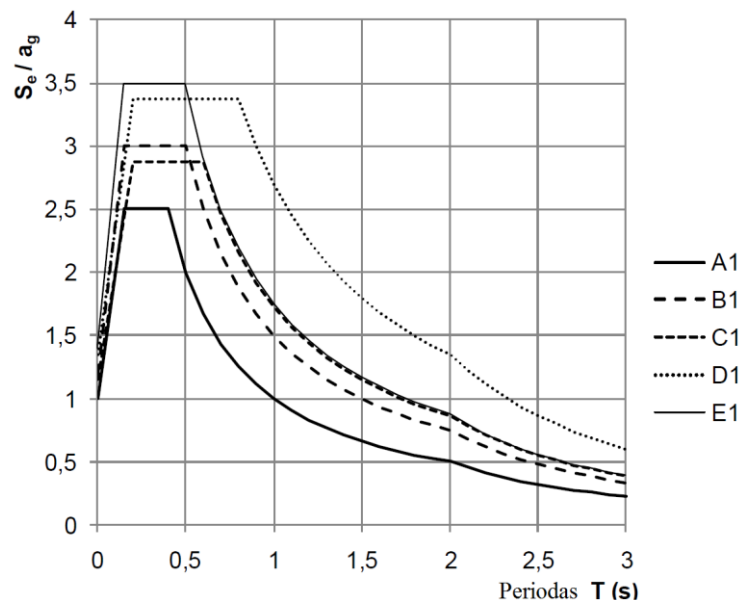


1.2.3 pav. Rekomenduojamas spektrinės formos 1 ir 2 tipų seisminiams poveikiams [2]

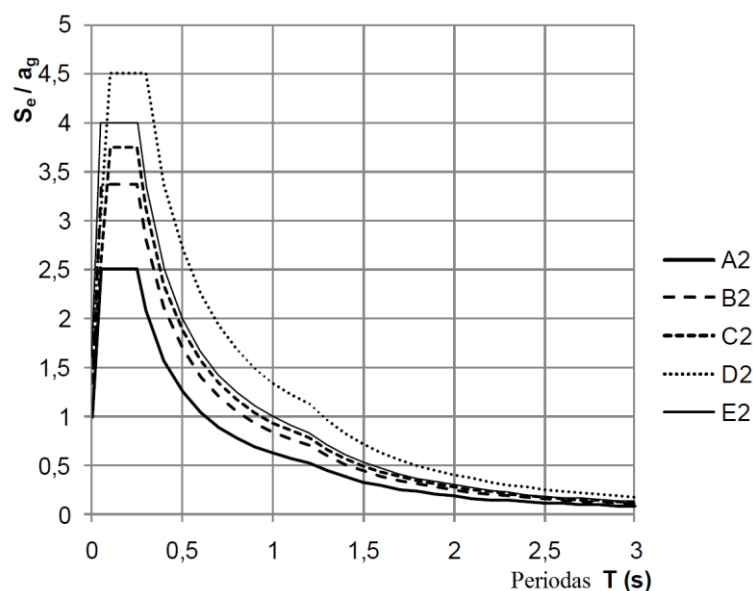
Iš grafiko matyti, kad 1 tipui (didesni reikšmingumai) būdingi ilgesni periodai, lyginant su 2 tipo (mažesni reikšmingumai) grafiku.

Grafike taip pat pateikta reikšmingumų grafikai, pateikti N. Ambraseys. Matyti, kad spektro forma su $M = 5,5$ reikšmingumu yra panaši į 2 tipo seisminį grafiką, kai tuo tarpu 1 tipą atitinka grafikas su reikšmingumu $M = 7$. Šis palyginimas atliktas su $R = 30$ km epicentrinio atstumu, tačiau su kitais atstumais rezultatai būtų panašūs.

Lygiai taip pat yra pateikiami grafikai (1.2.4 ir 1.2.5 pav.) abiem seisminiams poveikiams (1 ir 2 tipai) priklausomai nuo grunto tipo.



1.2.4 pav. Rekomenduojamos spektrinės formos 1 tipo seisminiam poveikiui pagal grunto tipą [2]



1.2.5 pav. Rekomenduojamos spektrinės formos 2 tipo seisminiam poveikiui pagal grunto tipą [2]

Rekomenduojamas grunto įtakos faktoriaus dydis grunto tipui A (akmuo) yra $S = 1$ ir kinta nuo $S = 1,2$ iki $S = 1,4$ kitiems gruntų tipams, esant 1 tipo seisminio poveikiui. 2 tipo seisminio poveikio atveju, grunto įtakos faktorius svyruoja nuo $S = 1,35$ iki $S = 1,8$.

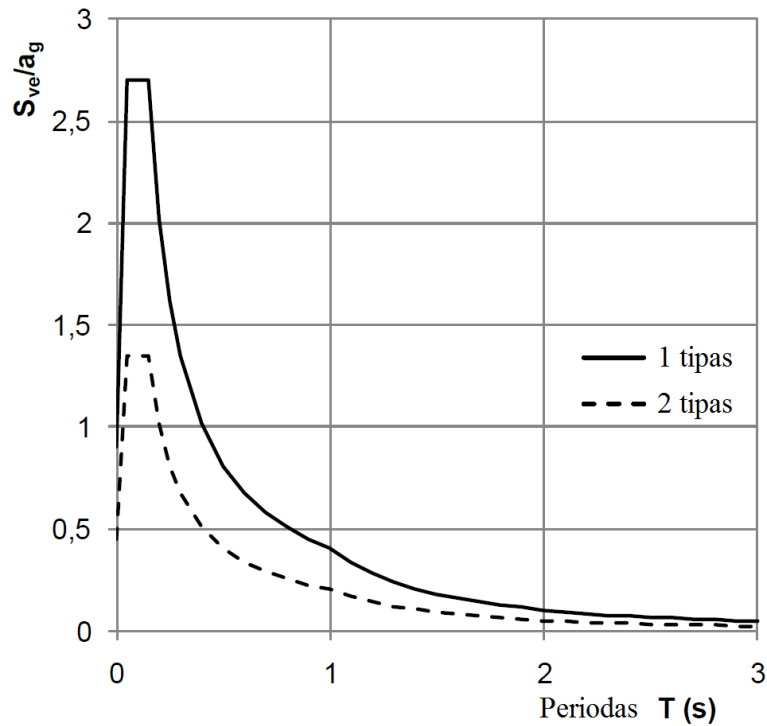
Vertikalus tamprusis spektras

Vertikali žemės judėjimo komponentė Eurokode apibūdinama kaip tamprusis žemės pagreičio atsako spektras S_{ve} , vadinamas „vertikaliu tampriuotu atsako spektru“.

Jis susijęs su vertikalaus pagreičio piku a_{vg} . Kiekvienai seisminei zonai vertikalus pagreitis yra duotas santykiu a_{vg}/a_g ir jis nustatomas nacionalinių institucijų.

Šio spektro grafikas yra panašus į horizontalaus spektro grafiką, įskaitant ir keturias dalis. Tačiau šiuo atveju, spektrinis didinimo laipsnis yra 3,0 vietoj 2,5, kuris taikomas horizontaliam spektrui.

Panašiai kaip ir horizontalioms komponentėms, rekomenduojamos dvi spektrinės formos – 1 ir 2 tipo žemės drebėjimams. Rekomenduojami santykių a_{vg}/a_g dydžiai yra 0,9 1 tipui ir 0,45 2 tipui. Rekomenduojami seisminio poveikio grafikai pateikiami 1.2.6 pav.



1.2.6 pav. Rekomenduojamas spektrinės formos vertikaliems tampriesiems spektrams [2]

Be to, reikia atkreipti dėmesį, kad vertikalūs žemės virpesiai nelabai įtakojami gruntų sudėties, dėl to grunto įtakos faktorius S nenaudojamas.

Šis grafikas gaunamas pagal tokias išraiškas:

$$0 \leq T \leq T_B: S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 3,0 - 1) \right] \quad (1.2.10)$$

$$T_B \leq T \leq T_C: S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \eta \cdot 3,0 \quad (1.2.11)$$

$$T_C \leq T \leq T_D: S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \eta \cdot 3,0 \left[\frac{T_C}{T} \right] \quad (1.2.12)$$

$$T_D \leq T \leq 4s: S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \eta \cdot 3,0 \left[\frac{T_C T_D}{T} \right] \quad (1.2.13)$$

1.2.5 lentelė. Rekomenduojamos parametrų vertės [2]

| Spektras | a_{vg}/a_g | $T_B(s)$ | $T_C(s)$ | $T_D(s)$ |
|----------|--------------|----------|----------|----------|
| 1 | 1,0 | 0,05 | 0,25 | 1,2 |
| 2 | 1,35 | 0,05 | 0,25 | 1,2 |

Grunto poslinkiai ir poslinkių spektras

Grunto poslinkiai, kurie priklausomi nuo grunto paviršiaus pagreičio, gali būti apskaičiuojami formule:

$$d_g = 0,025 \cdot a_g \cdot S \cdot T_C \cdot T_D \quad (1.2.14)$$

Be grunto poslinkių, Eurokodas nurodo tamprųjų poslinkių atsako spektrą $S_{De}(T)$. Jis nurodo santykinį poslinkį ir yra taikomas statiniams su ilgais virpesių periodais, bet gali būti taikomi ir trumpų periodų virpesiams.

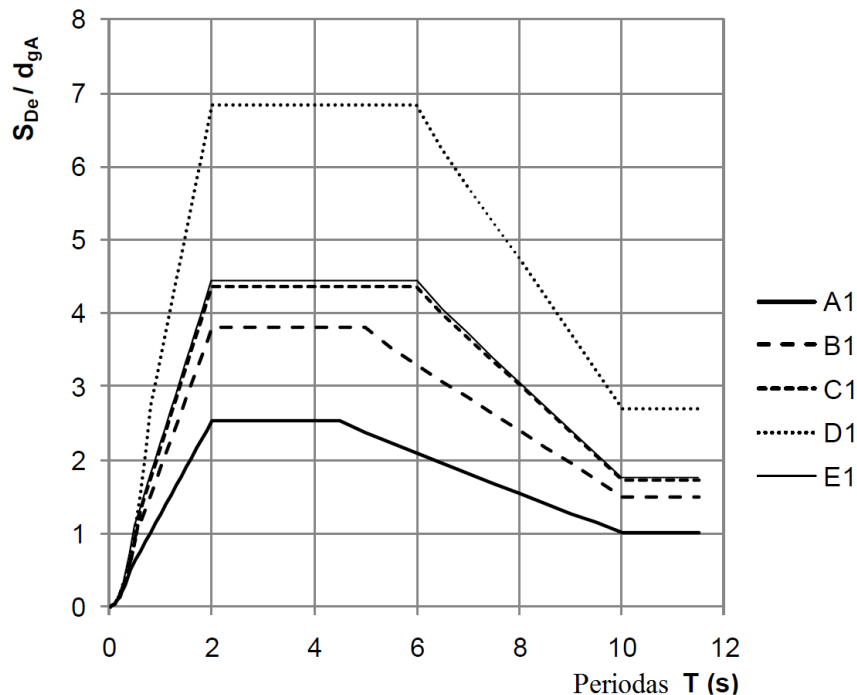
Iki nekintančios poslinkių dalies grafike, tiesioginio tampriojo spektro $S_e(T)$ vertimui į $S_{De}(T)$ gali būti tokia formulė, jeigu virpesių periodas neviršina 4,0 s :

$$S_{De}(T) = S_e(T) \left[\frac{T}{2\pi} \right]^2 \quad (1.2.15)$$

Po nekintančių poslinkių atkarpos, išskiriami du papildomi kreivės taškai T_E ir T_F . Taške T_E pasibaigia nekintantys poslinkiai. Tada, tarp T_E ir T_F spektrinės ordinatės mažėja ir artėja prie žemės poslinkių d_g . Po to, poslinkiai vėl pasidaro nekintantys ir prisilygina d_g .

Eurokode rekomenduojamos vertės grunto tipui A – $T_E = 4,5$ s, B – $T_E = 5,0$ s, C ir E – $T_E = 6,0$ s. Taškui F rekomenduojama $T_F = 10$ s.

Tamprųjų poslinkių spektras įvairiems gruntų tipams pateikiamas 1.2.7 pav.



1.2.7 pav. Rekomenduojamas poslinkių grafikas 1 seiminiam tipui pagal gruntų tipą [2]

Šis grafikas gaunamas pagal tokias išraiškas:

$$0 \leq T \leq T_B: S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \left[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \cdot \left(\frac{2,5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right] \quad (1.2.16)$$

$$T_B \leq T \leq T_C: S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \quad (1.2.17)$$

$$T_C \leq T \leq T_D: S_d(T) = \begin{cases} a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left[\frac{T_C}{T} \right] \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases} \quad (1.2.18)$$

$$T_D \leq T: S_d(T) = \begin{cases} a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right] \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases} \quad (1.2.19)$$

čia $S_d(T)$ – skaičiuojamasis spektras

q – elgsenos faktorius

β – horizontaliojo skaičiuotinio spektro žemiausias reikšmės koeficientas,

rekomenduotina reikšmė $\beta = 0,2$

2. SKAIČIAVIMAI PAGAL NORMAS

2.1. Preliminarūs duomenys skaičiavimams

Turimi tokie preliminarūs duomenys:

Plieno tamprumo modulis

$$E = 2,1 \cdot 10^6 \text{ MPa} = 2,1 \cdot 10^7 \text{ N/cm}^2 \quad (2.1.1)$$

Kolonos HEB300 skerspjūvio ploto inercijos momentai

$$I_x = 25170 \text{ cm}^4, I_y = 8563 \text{ cm}^4 \quad (2.1.2)$$

Kolonos aukštis

$$H = 12 \text{ m} = 1200 \text{ cm} \quad (2.1.3)$$

Bokšto konstrukcijų masė:

$$m = 20 \text{ t} = 20000 \text{ kg} \quad (2.1.4)$$

Rezervuaro tūris:

$$V = 60 \text{ m}^3 \quad (2.1.5)$$

Vandens masė rezervuare:

$$m = 60 \text{ t} = 60000 \text{ kg} \quad (2.1.6)$$

2.2. Svyravimo periodų apskaičiavimas [1]

Pastatui pasislinkus x ašies kryptimi standumo koeficientas:

$$k_x = \frac{3EI_y}{H^3} = \frac{3 \cdot 2,1 \cdot 10^7 \cdot 8563}{1200^3} = 312,193 \text{ N/cm} \quad (2.2.1)$$

Kadangi yra keturios kolonos, tai:

kampinis dažnis

$$w_{ox} = \sqrt{\frac{4k_x}{m}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 312,193 \cdot 10^2}{(20 + 60) \cdot 10^3}} = 1,249 \text{ rad/s} \quad (2.2.2)$$

dažnis

$$f_{ox} = \frac{w_{ox}}{2\pi} = \frac{1,249}{2 \cdot 3,14} = 0,199 \text{ Hz} \quad (2.2.3)$$

periodas

$$T_{ox} = \frac{1}{f_{ox}} = \frac{1}{0,199} = 5,02 \text{ s} \quad (2.2.4)$$

Pastatui pasislinkus y ašies kryptimi standumo koeficientas:

$$k_y = \frac{3EI_x}{H^3} = \frac{3 \cdot 2,1 \cdot 10^7 \cdot 25170}{1200^3} = 917,656 \text{ N/cm} \quad (2.2.5)$$

kampinis dažnis

$$w_{oy} = \sqrt{\frac{4k_y}{m}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 917,656 \cdot 10^2}{(20 + 60) \cdot 10^3}} = 2,142 \text{ rad/s} \quad (2.2.6)$$

dažnis

$$f_{oy} = \frac{w_{oy}}{2\pi} = \frac{2,142}{2 \cdot 3,14} = 0,341 \text{ Hz} \quad (2.2.7)$$

periodas

$$T_{oy} = \frac{1}{f_{oy}} = \frac{1}{0,341} = 2,93 \text{ s} \quad (2.2.8)$$

2.3. Tamprieji reakcijos spektrai pagal ir šoninės jėgos analizė pagal EC8

Tampriosios pagreičio reakcijos spektras

Pirmiausia pradant statinio analizę, reikia įsivertinti, kokio svarbumo jis yra ir kuriai svarbumo klasei priklauso. Kadangi projektuojamo bokšto paskirtis bus laikyti vandenį, tai jo sugriuvimo metu nebūtų padaryta didelė žala, tačiau turint omenyje nemažą aukštį, visgi gali būti padaryta vidutinio dydžio žala. Taigi atkreipiant dėmesį į šias aplinkybes, pagal 2.3.1 lentelę parenkama II svarbumo klasė, kurios svarbumo koeficientas $\gamma_I = 1,0$.

2.3.1 lentelė. Svarbumo klasės pagal pastato tipus ir svarbumo koeficiento parinkimas

| Svarbumo klasė | Pastato tipas | Svarbumo koeficientas γ_I |
|----------------|--|----------------------------------|
| I | Mažo svarbumo pastatai, pvz. ūkiniai pastatai ir kt. | 0,8 |
| II | Įprasti pastatai, nepriklausantys kitoms kategorijoms | 1,0 |
| III | Pastatai, kurių seisminis atsparumas yra svarbus lyginant su pasekmėmis griuvimo metu, pvz. mokyklos, susirinkimo vietos, kultūrinės patalpos ir kt. | 1,2 |
| IV | Pastatai, kurių vientisumas per žemės drebėjimus yra labai svarbus, pvz. ligoninės, ugniagesių stotys, elektros jėgainės ir kt. | 1,4 |

Tolesniems skaičiavimas reikia apsiskaičiuoti A tipo grunto skaičiuotinį pagreitį:

$$a_g = a_{gR} \cdot \gamma_I = 1,8 \cdot 1,0 = 1,8 \text{ m/s}^2 \quad (2.3.1)$$

čia $a_{gR} = 1,8 \text{ m/s}^2$ – A tipo grunto pagreitis labai mažo seismingumo regionams

Žemės drebėjimo įtaka statiniui nemažai priklauso nuo grunto esančiu po juo, todėl reikalinga pasirinkti grunto tipą. Galimi grunto tipai pateikiami 2.3.2 lentelėje. Pasirenkamas B grunto tipas – tankaus smėlio telkiniai, žvyras arba tvirtas molis, mažiausiai kelių dešimčių metrų storio, apibūdinamas palaiipsniu grunto mechaninių savybių didėjimu gilėjant.

2.3.2 lentelė. Grunto tipo parinkimas

| Grunto tipas | Grunto apibūdinimas | Parametrai | | |
|--------------|--|----------------|---------------|----------------|
| | | $v_{s,30}$ | N_{SPT} | c_u |
| A | Akmenys ir kiti dariniai panašūs į akmenis | >800 | - | - |
| B | Tankaus smėlio telkiniai, žvyras arba tvirtas molis, mažiausiai kelių dešimčių metrų storio, apibūdinamas palaipsniu grunto mechaninių savybių didėjimu gilėjant | 360-800 | >50 | >250 |
| C | Gilūs tankaus arba vidutiniškai tankaus smėlio, žvyro ar tvirto molio, nuo kelių dešimčių iki šimtų metrų storio | 180-360 | 15-50 | 70-250 |
| D | Mažai koheziško molio ar daugiausia minkšto molio gruntas. | <180 | 15 | <70 |
| E | Gruntas, kurį sudaro paviršinis aliuvinis sluoksnis su C ir D gruntų v_s reikšmėmis ir grunto 5-20 m grunto storio, po kuriuo būtų grunto sluoksnis, kurio $v_s > 800$ m/s | | | |

Pagal [1] yra nustatyti 2 tipai tampriosios reakcijos spektrų. Pirmasis – dideliems seismingumo regionams, antrasis – mažo seismingumo regionams. Kadangi pasirinkta mažo seismingumo regionas, dėl to reikia sudaryti 2 tipo tampriosios reakcijos spektrą, kurio parametrai pateikti 2.3.3 lentelėje.

2.3.3 lentelė. Rekomenduojamos 2 tipo tampriosios reakcijos spektro parametrų reikšmės

| Grunto tipas | S | $T_B(s)$ | $T_C(s)$ | $T_D(s)$ |
|--------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| A | 1,0 | 0,05 | 0,25 | 1,2 |
| B | 1,35 | 0,05 | 0,25 | 1,2 |
| C | 1,5 | 0,10 | 0,25 | 1,2 |
| D | 1,8 | 0,10 | 0,30 | 1,2 |
| E | 1,6 | 0,05 | 0,25 | 1,2 |

Pasirenkamas grunto tipas B. Tada braižoma tampriosios reakcijos į horizontaliąsias seisminio poveikio komponentes spektras $S_e(T)$ pagal šias išraiškas:

$$0 \leq T \leq T_B: S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2,5 - 1) \right] \quad (2.3.2)$$

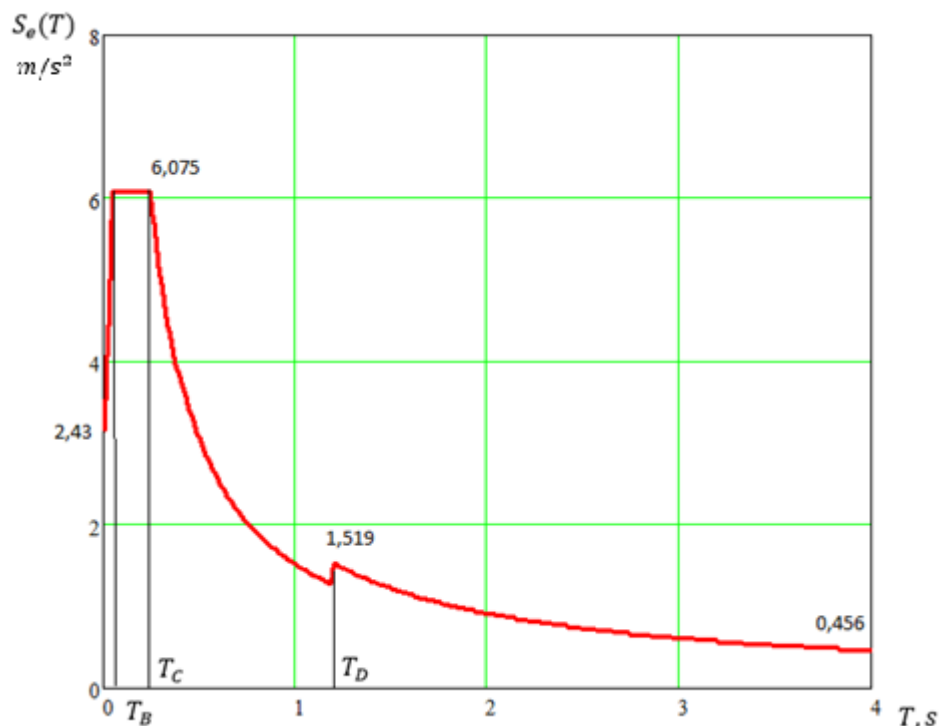
$$T_B \leq T \leq T_C: S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \quad (2.3.3)$$

$$T_C \leq T \leq T_D: S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \left[\frac{T_C}{T} \right] \quad (2.3.4)$$

$$T_D \leq T \leq 4s: S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right] \quad (2.3.5)$$

- čia $S_e(T)$ – tampriosios pagreičio reakcijos spektras;
 T – tiesinės vieno laisvės laipsnio sistemos virpesių periodas;
 a_g – A tipo grunto skaičiuotinis pagreitis
 T_B – pastovaus spektrinio pagreičio atšakos periodo apatinė riba;
 T_C – pastovaus spektrinio pagreičio atšakos periodo viršutinė riba;
 T_D – pastovios poslinkio reakcijos intervalo spektre pradžios reikšmė;
 S – grunto koeficientas;
 η – pataisos dėl slopinimo koeficientas, kurio pagal 5% klampiojo slopinimo standartinę reikšmę lygi 1

Pagal turimus intervalus braižomas grafikas programa Mathcad ir gautas grafikas pateikiamas 2.3.1 pav.



2.3.1 pav. Tampriosios pagreičio reakcijos spektras

Tuomet pagal 2.2 skyriuje gautus svyravimo periodus x ir y kryptimis, galime nustatyti spektro reikšmę atitinkamuose taškuose. Kadangi x ašies kryptimi gautas periodai $T_{ox} = 5,02 > 4$, tai priimama, kad $T_x = 4$ s:

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right] = 1,8 \cdot 1,35 \cdot 1 \cdot 2,5 \left[\frac{0,25 \cdot 1,2}{4^2} \right] = 0,114 \text{ m/s}^2 \quad (2.3.6)$$

čia $T_C = 0,25$ s – pastovaus spektrinio pagreičio atšakos periodo viršutinė riba

$T_D = 1,2$ s – pastovios poslinkio reakcijos intervalo spektre pradžios reikšmė

Svyravimams y ašies kryptimi, kai $T_{oy} = 2,93$:

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right] = 1,8 \cdot 1,35 \cdot 1 \cdot 2,5 \left[\frac{0,25 \cdot 1,2}{2,93^2} \right] = 0,212 \text{ m/s}^2 \quad (2.3.7)$$

Tampriosios poslinkio reakcijos spektras

Tampriosios poslinkio reakcijos spektras sudaromas pagal tokią išraišką:

$$S_{De}(T) = S_e(T) \left[\frac{T}{2\pi} \right]^2 \quad (2.3.8)$$

čia $S_e(T)$ – tampriosios pagreičio reakcijos spektras

T – tiesinės vieno laisvės laipsnio sistemos virpesių periodas

Pagal 2.2.1 formulę apskaičiuojama:

poslinkis pastatui pasislinkus x ašies kryptimi

$$S_{De}(T_{ox}) = S_e(T) \left[\frac{T_{ox}}{2\pi} \right]^2 = 0,114 \cdot \left[\frac{4}{2 \cdot 3,14} \right]^2 = 0,046 \text{ m} = 46 \text{ mm} \quad (2.3.9)$$

poslinkis pastatui pasislinkus y ašies kryptimi

$$S_{De}(T_{oy}) = S_e(T) \left[\frac{T_{oy}}{2\pi} \right]^2 = 0,212 \cdot \left[\frac{2,93}{2 \cdot 3,14} \right]^2 = 0,046 \text{ m} = 46 \text{ mm} \quad (2.3.10)$$

Šoninės jėgos analizė

Naudojant šoninės jėgos metodą naudojami 1.2 skyriuje apskaičiuoti periodai $T_{ox} = 5,02$ s ir $T_{oy} = 2,93$ s.

Šoninės jėgos analizė x ašies kryptimi

Skaičiuojama periodą atitinkantis tampriojo pagreičio reakcijos spektras $S_d(T)$ kai:

$$S_d(T_{ox}) = \frac{2,5 \cdot a_g \cdot S \cdot T_C}{q \cdot T_{ox}} = \frac{2,5 \cdot 1,8 \cdot 1,35 \cdot 0,25}{2 \cdot 1,548} = 0,114 \text{ m/s}^2 \quad (2.3.11)$$

čia S – grunto koeficientas

T_C – pastovaus spektrinio pagreičio atšakos periodo viršutinė riba

T_{ox} – konstrukcijos svyravimo periodas x ašies kryptimi

q – konstrukcijos elgsenos faktorius lygus 2

Skaičiuojama seisminės šlyties jėga:

$$F_{bRx} = m \cdot S_d(T_{ox}) \cdot \lambda = 80 \cdot 0,114 \cdot 1 = 9,113 \text{ kN} \quad (2.3.12)$$

čia $m = 80 \cdot 10^3 \text{ kg}$

λ – koeficientas lygus 1,0

Norint įvertinti tempimo efektą, šlyties jėgą F_{bRx} reikia padauginti iš koeficiento δ :

$$\delta = 1 + 0,6 \cdot \frac{x}{L} = 1 + 0,6 \cdot 1 = 1,6 \quad (2.3.13)$$

čia x/L – jėgos atstumo nuo geometrinio konstrukcijos centro įvertinimas, lygus 1

Skaičiuojama šlyties jėga įvertinus tempimą:

$$F_{bx} = F_{bRx} \cdot \delta = 9,113 \cdot 1,6 = 14,58 \text{ kN} \quad (2.3.14)$$

Lenkimo momentas veikiantis vieną koloną:

$$M = F_{bx} \cdot \frac{H}{4} = 14,58 \cdot \frac{12}{4} = 43,74 \text{ kNm} \quad (2.3.15)$$

Šoninės jėgos analizė y ašies kryptimi

Skaičiuojama periodą atitinkantis tampriojo pagreičio spektras $S_d(T)$ kai : $T_C < T < T_D$

$$S_d(T_{oy}) = \frac{2,5 \cdot a_g \cdot S \cdot T_C}{q \cdot T_{oy}} = \frac{2,5 \cdot 1,8 \cdot 1,35 \cdot 0,25}{2 \cdot 2,93} = 0,212 \text{ m/s}^2 \quad (2.3.16)$$

čia S – grunto koeficientas

T_C – pastovaus spektrinio pagreičio atšakos periodo viršutinė riba

T_{oy} – konstrukcijos svyravimo periodas y ašies kryptimi

q – konstrukcijos elgsenos faktorius lygus 2

Skaičiuojama seisminės šlyties jėga:

$$F_{bRy} = m \cdot S_d(T_{oy}) \cdot \lambda = 80 \cdot 0,212 \cdot 1 = 16,962 \text{ kN} \quad (2.3.17)$$

čia $m = 170 \cdot 10^3 \text{ kg}$

λ – koeficientas lygus 1,0

Norint įvertinti tempimo efektą, šlyties jėgą F_{bRy} reikia padauginti iš koeficiento δ :

$$\delta = 1 + 0,6 \cdot \frac{x}{L} = 1 + 0,6 \cdot 1 = 1,6 \quad (2.3.18)$$

čia x/L – jėgos atstumo nuo geometrinio konstrukcijos centro įvertinimas, lygus 1

Skaičiuojama šlyties jėga įvertinus tempimą:

$$F_{by} = F_{bRy} \cdot \delta = 16,962 \cdot 1,6 = 27,14 \text{ kN} \quad (2.3.19)$$

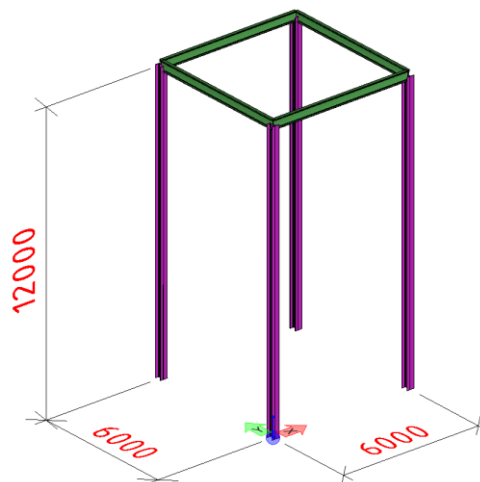
Lenkimo momentas veikiantis konstrukciją:

$$M = F_{by} \cdot \frac{H}{4} = 27,14 \cdot \frac{12}{4} = 81,42 \text{ kNm} \quad (2.3.20)$$

3. SKAIČIAVIMAI PROGRAMA SOFiSTiK

3.1. Bokšto geometrija, konstrukcijos ir apkrovos

Bokšto pagrindines konstrukcijas sudaro 12 metrų ilgio kolonos iš HEB300 profilio ir bokšto viršuje esantis standžiai įtvirtintų 6 metrų ilgio sijų kvadratinės formos žiedas iš HEB700 profilių.

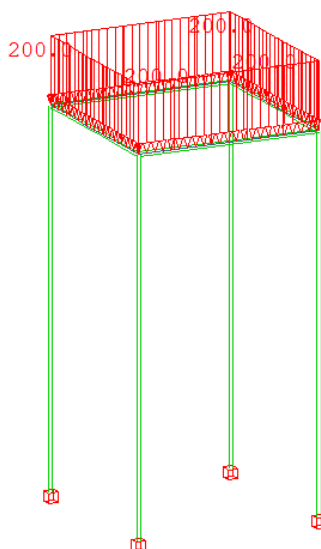


3.1.1 pav. Bokšto geometrija

Pirmiausia iš medžiagų bibliotekos pasirenkama plieno klasė S355 bei skaičiavimams naudojami skerspjūviai. Pagrindinių konstrukcijų (kolonų ir sijų) skerspjūvių charakteristikos naudojamos iš programos bibliotekos.

Skaičiavimams bus naudojama teoriniams skaičiavimams priimta taškinė apkrova 80 tonų. Ši apkrova perduodama bokšto pagrindinėms sijoms kaip išskirstyta apkrova, kuri lygi:

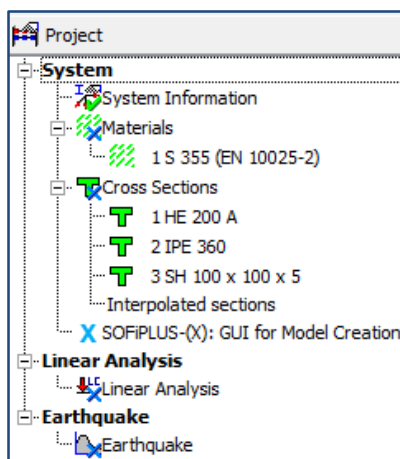
$$q = \frac{m \cdot g}{4} = \frac{80 \cdot 10}{4} = 200 \text{ kN/m} \quad (3.1.1)$$



3.1.2 pav. Apkrovos veikiančios bokšto konstrukciją

3.2. Seisminė analizė

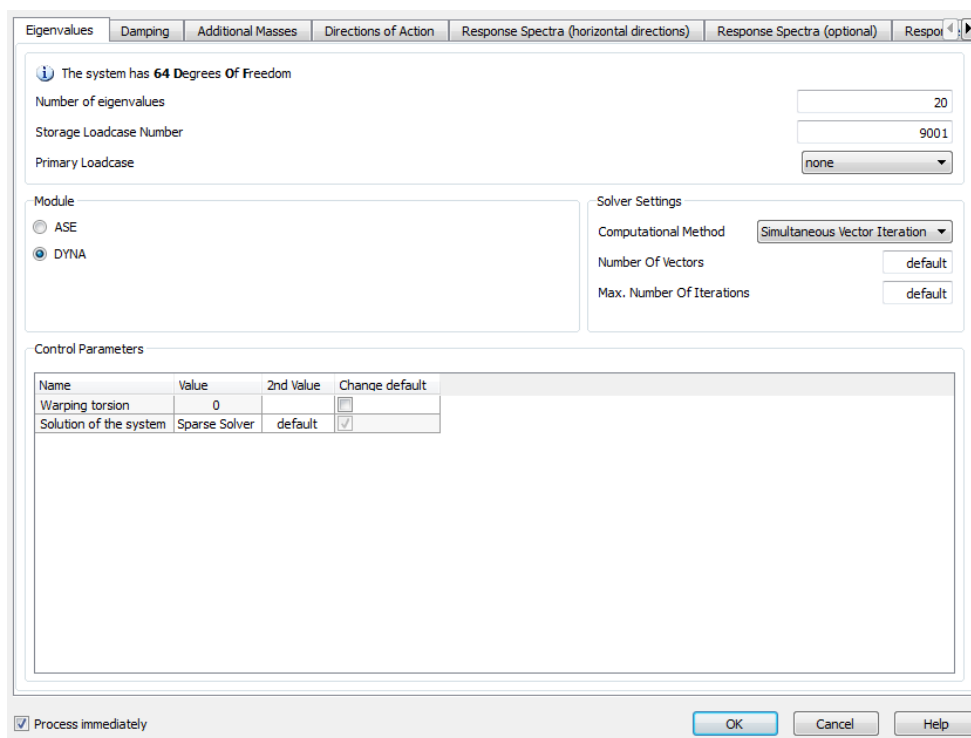
Interaktyvioje SOFiPLUS aplinkoje subraižoma bokšto konstrukcijų linijos ir joms priskiriama medžiagos tipas, skerspjūviai bei apkrovos. Geometrijos patikrinimui, kad išvengtų klaidų, įvedama tiesinės analizės (Linear Analysis) komanda. Galiausiai seisminiui poveikiui skaičiuoti įvedama komanda Earthquake (3.2.1 pav.).



3.2.1 pav. Skaičiavimų programoje medis

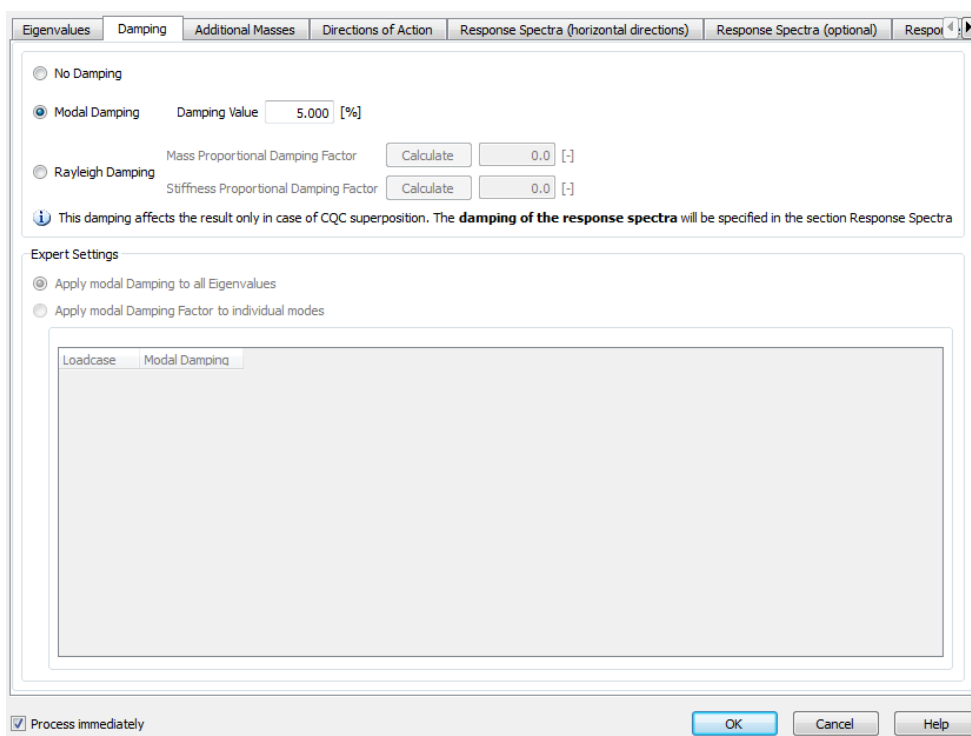
Tada reikia įvesti į komandą Earthquake skaičiavimams reikalingus parametrus.

Pirmajame lange (3.2.2 pav.) aprašomas virpesių modų generavimas. Bus tiriama 20 pagrindinių virpesių modų („Number of eigenvalues“ įvedama reikšmė „20“). Kiti laukai paliekami pagal numatytus nustatymus, jų pilnai užtenka dauguma atvejų.



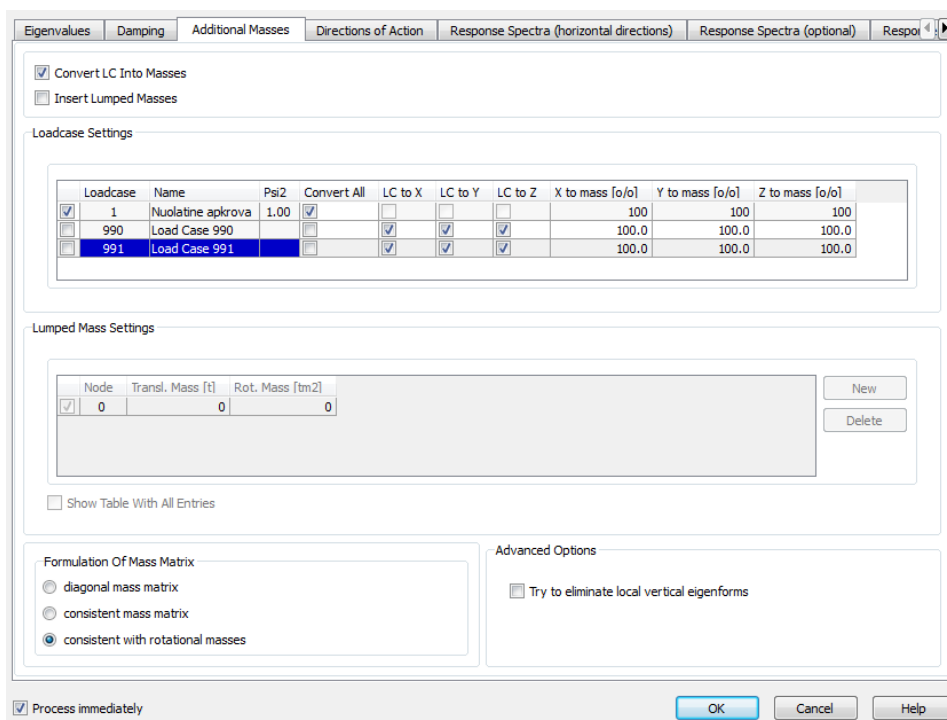
3.2.2 pav. Virpesių modų generavimas

Kitame skirtuke (2.2.3 pav.) aprašoma virpesių slopinimas, kuris daugumai pastatų taikomas 3-5%. Savo atveju pasirenku 5% slopinimą.

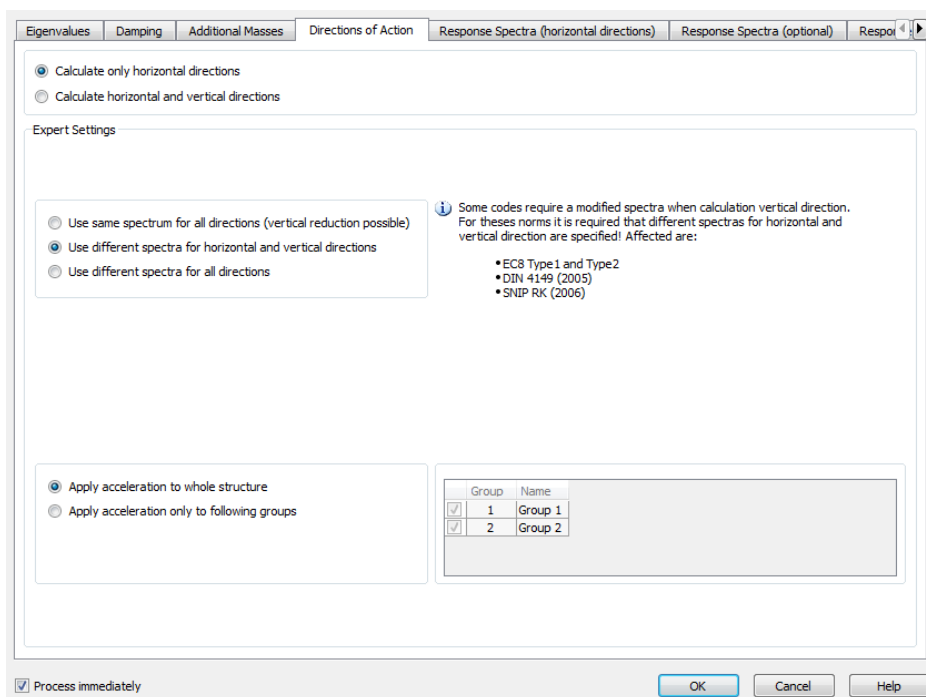


3.2.3 pav. Virpesių slopinimas

Skirtukuose „Additional Masses“ (3.2.4 pav.) bei „Directions of actions“ (3.2.5 pav.) aprašoma apkrovų konvertavimas į mases ir jų veikimo kryptys. Masių sudarymas reikalingas seisminiai analizei atlikti.

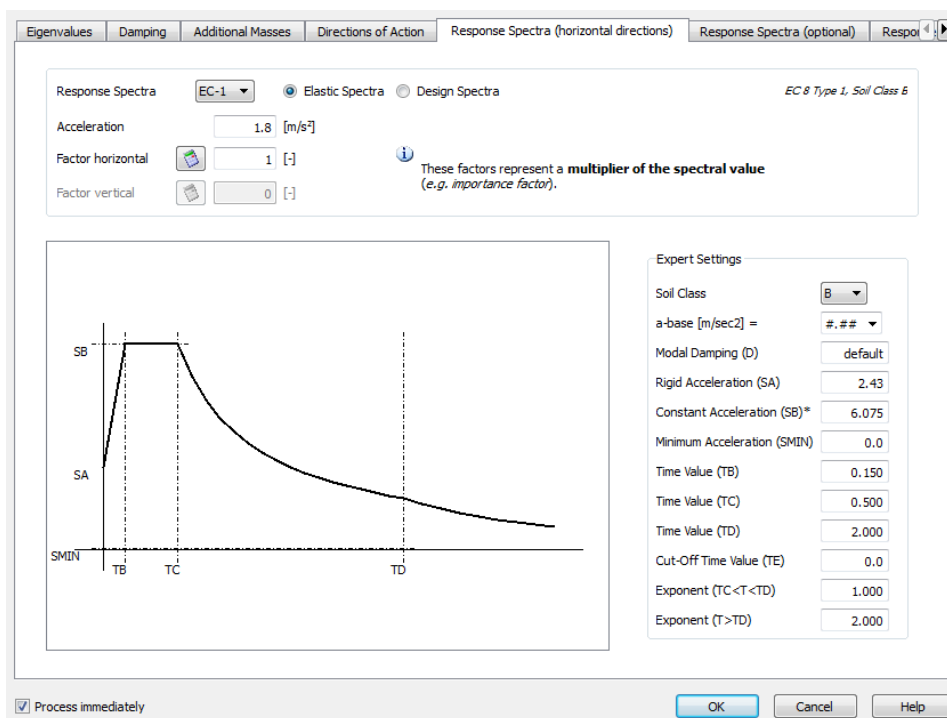


3.2.4 pav. Apkrovų konvertavimas į mases



3.2.5 pav. Apkrovų veikimo krypties nustatymas

Galiausiai aprašoma tampriosios pagreičio reakcijos spektras (3.2.6 pav.), kuris buvo apskaičiuotas antrajame tiriamajame darbe. Taipogi naudojama tas pats dirvožemio tipas B ir grunto skaičiuotinis pagreitis lygus $1,8 \text{ m/s}^2$.



3.2.6 pav. Atsako spektro apibrėžimas

Kai visi reikalingi parametrai suvesti į užduotis, paleidžiami skaičiavimai, kurie analizuoja veikiančias apkrovas, jas paverčia į seismines mases ir tada atliekama seisminė analizė.

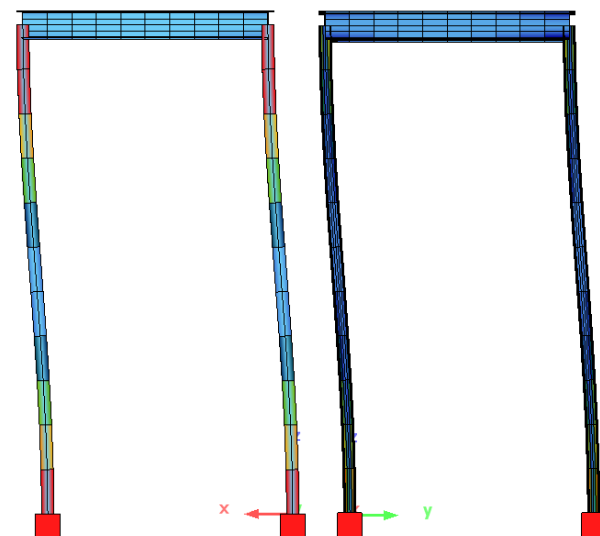
3.3. Bokšto konstrukcija be ryšių

Virpesių modos ir dažniai

Seisminėje analizėje nagrinėjamas dinaminis poveikis pirmiausia reikia atsižvelgti į virpesių modos ir jų svyravimų periodus. Iš 3.3.1 pav. galima matyti, kad x ašies kryptimi didžiausią polinkį pasireikšti turi pirmoji moda, o y kryptimi trečioji (3.3.2 pav.). Atitinkamais atvejais svyravimo periodai $T_{ox} = 6,26$ s ir $T_{oy} = 3,722$ s.

| No. | LC | Eigenvalue [1/sec ²] | relative Error | omega [1/sec] | frequency [Hertz] | period [sec] | Damping D[%] | f-XX [%] | f-YY [%] | f-ZZ [%] |
|-----|------|-------------------------------------|-------------------|------------------|----------------------|-----------------|-----------------|-------------|-------------|-------------|
| 1 | 9001 | 1.0087E+00 | 0.00E+00 | 1.004 | 0.160 | 6.256 | 0.000 | 99.6 | 0.0 | 0.0 |
| 2 | 9002 | 2.8103E+00 | 0.00E+00 | 1.676 | 0.267 | 3.748 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 3 | 9003 | 2.8494E+00 | 0.00E+00 | 1.688 | 0.269 | 3.722 | 0.000 | 0.0 | 99.6 | 0.0 |
| 4 | 9004 | 3.9463E+01 | 0.00E+00 | 6.282 | 1.000 | 1.000 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 5 | 9005 | 1.1176E+02 | 0.00E+00 | 10.572 | 1.683 | 0.594 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 6 | 9006 | 4.1686E+02 | 0.00E+00 | 20.417 | 3.249 | 0.308 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 7 | 9007 | 4.1791E+02 | 0.00E+00 | 20.443 | 3.254 | 0.307 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 8 | 9008 | 5.5428E+02 | 0.00E+00 | 23.543 | 3.747 | 0.267 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 9 | 9009 | 1.0391E+03 | 7.33E-14 | 32.236 | 5.130 | 0.195 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 91.0 |
| 10 | 9010 | 1.2669E+03 | 0.00E+00 | 35.593 | 5.665 | 0.177 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 11 | 9011 | 1.3036E+03 | 1.77E-13 | 36.105 | 5.746 | 0.174 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 12 | 9012 | 1.7656E+03 | 9.05E-13 | 42.018 | 6.687 | 0.150 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.1 |
| 13 | 9013 | 1.9644E+03 | 3.24E-13 | 44.322 | 7.054 | 0.142 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 14 | 9014 | 2.7127E+03 | 2.06E-12 | 52.083 | 8.289 | 0.121 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 15 | 9015 | 2.7129E+03 | 1.67E-12 | 52.086 | 8.290 | 0.121 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 16 | 9016 | 3.6796E+03 | 6.38E-09 | 60.659 | 9.654 | 0.104 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 17 | 9017 | 3.6869E+03 | 1.20E-06 | 60.720 | 9.664 | 0.103 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 18 | 9018 | 3.6942E+03 | 9.85E-07 | 60.780 | 9.673 | 0.103 | 0.000 | 0.2 | 0.0 | 0.0 |
| 19 | 9019 | 3.7222E+03 | 1.10E-07 | 61.009 | 9.710 | 0.103 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.4 |
| 20 | 9020 | 3.9144E+03 | 4.32E-09 | 62.566 | 9.958 | 0.100 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 21 | | 3.9156E+03 | 4.93E-07 | 62.574 | 9.959 | 0.100 | | | | |
| 22 | | 3.9157E+03 | 2.08E-06 | 62.576 | 9.959 | 0.100 | | 99.8 | 99.6 | 91.6 |

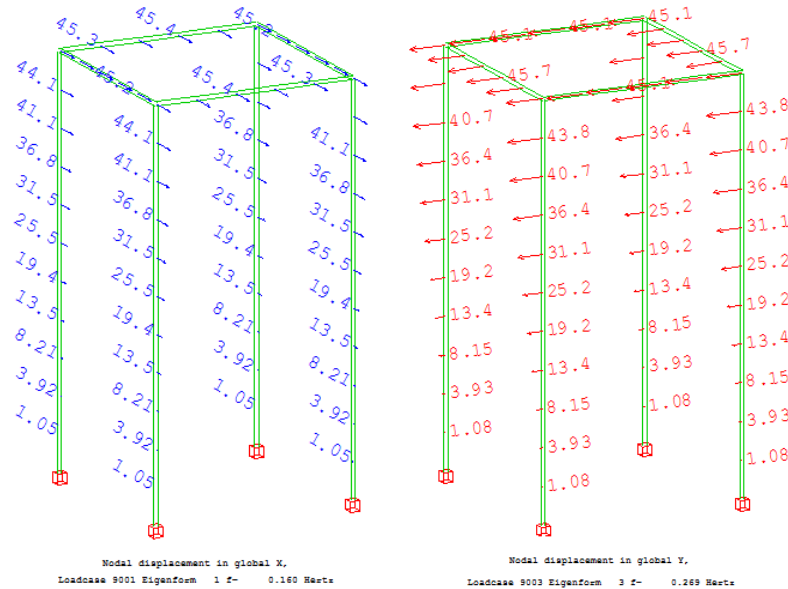
3.3.1 pav. Svyravimo modų charakteristikos



3.3.2 pav. Pirmoji moda (x kryptis) ir trečioji moda (y kryptis)

Poslinkiai

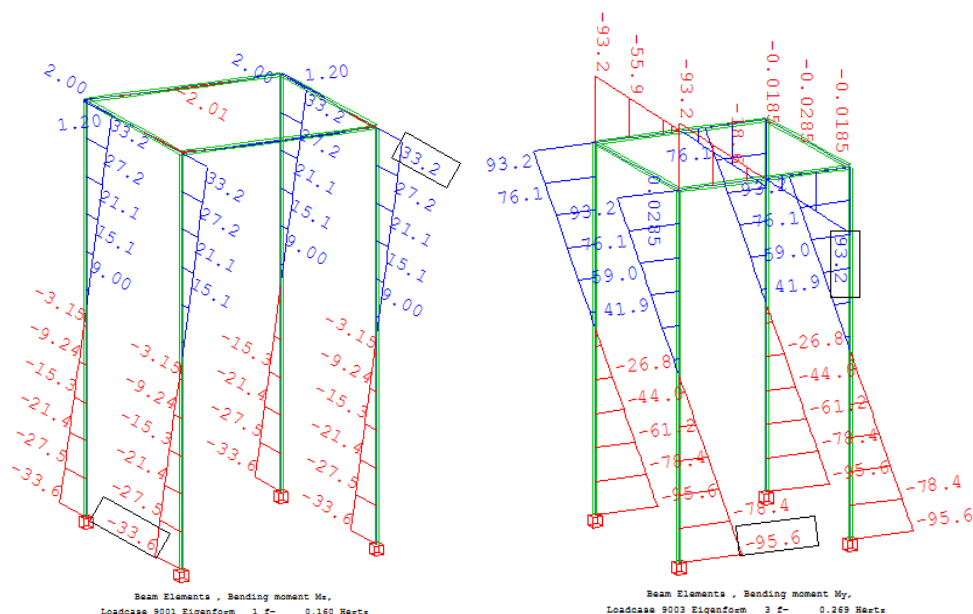
Analizuojama konstrukcijoje atsiradę poslinkiai dėl seisminio poveikio. Šiems tyrimams svarbiausi yra kolonų viršaus poslinkiai x ir y ašių kryptimis (3.3.3 pav.). Matome, kad poslinkiai x ašies kryptimi yra 45,2mm, o y ašies kryptimi 45,1mm. Kitaip tariant, poslinkiai yra beveik vienodi, nors kolonų standumai skiriasi apie 1,5 karto.



3.3.3 pav. Konstrukcijos poslinkiai x ir y kryptimis atitinkamų modų atvejais

Lenkimo momentai

Taipogi surandama konstrukcijas veikiančys didžiausi lenkimo momentai skirtingomis kryptimis, iš kurių mums svarbiausi yra kolonų apačioje atsiradę momentai atitinkamomis kryptimis (3.3.4 pav.)



3.3.4 pav. Konstrukcijos lenkimo momentai x ir y kryptimis atitinkamų modų atvejais

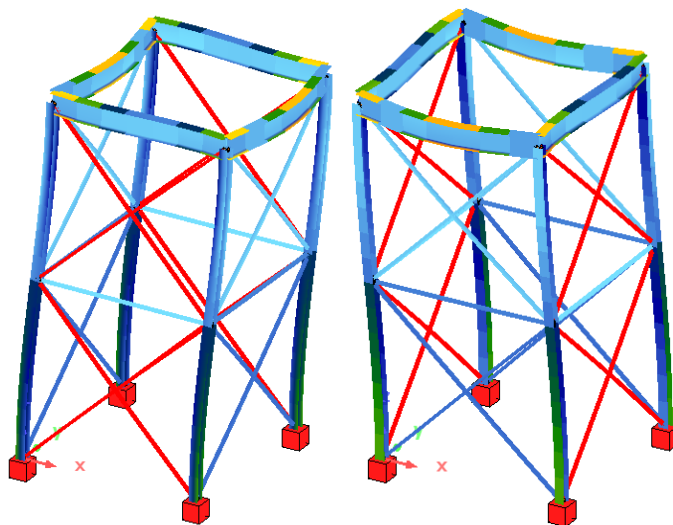
3.4. Bokšto konstrukcija su X formos ryšiais

Bokštui su X formos ryšiais svyravimo modų charakteristikos pateikiamos 3.4.1 pav.

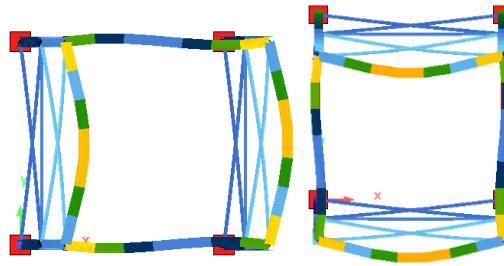
| No. | LC | Eigenvalue [1/sec ²] | relative Error | omega [1/sec] | frequency [Hertz] | period [sec] | Damping D[%] | f-XX [%] | f-YY [%] | f-ZZ [%] |
|-----|------|-------------------------------------|-------------------|------------------|----------------------|-----------------|-----------------|-------------|-------------|-------------|
| 1 | 9001 | 6.9420E+01 | 0.00E+00 | 8.332 | 1.326 | 0.754 | 0.000 | 97.0 | 0.0 | 0.0 |
| 2 | 9002 | 7.0483E+01 | 0.00E+00 | 8.395 | 1.336 | 0.748 | 0.000 | 0.0 | 96.9 | 0.0 |
| 3 | 9003 | 1.1213E+02 | 0.00E+00 | 10.589 | 1.685 | 0.593 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 4 | 9004 | 1.2520E+02 | 0.00E+00 | 11.189 | 1.781 | 0.562 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 5 | 9005 | 1.4071E+02 | 0.00E+00 | 11.862 | 1.888 | 0.530 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 6 | 9006 | 4.7201E+02 | 0.00E+00 | 21.726 | 3.458 | 0.289 | 0.000 | 2.0 | 0.0 | 0.0 |
| 7 | 9007 | 4.7302E+02 | 0.00E+00 | 21.749 | 3.461 | 0.289 | 0.000 | 0.0 | 2.1 | 0.0 |
| 8 | 9008 | 5.5535E+02 | 0.00E+00 | 23.566 | 3.751 | 0.267 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 9 | 9009 | 7.5930E+02 | 1.28E-12 | 27.555 | 4.386 | 0.228 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 10 | 9010 | 7.5932E+02 | 2.94E-08 | 27.556 | 4.386 | 0.228 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 11 | 9011 | 7.5935E+02 | 6.38E-09 | 27.556 | 4.386 | 0.228 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 12 | 9012 | 7.5936E+02 | 1.57E-08 | 27.557 | 4.386 | 0.228 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 13 | 9013 | 7.5952E+02 | 2.03E-09 | 27.559 | 4.386 | 0.228 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 14 | 9014 | 7.5952E+02 | 4.38E-10 | 27.559 | 4.386 | 0.228 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 15 | 9015 | 7.6015E+02 | 4.50E-09 | 27.571 | 4.388 | 0.228 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 16 | 9016 | 7.6017E+02 | 3.48E-09 | 27.571 | 4.388 | 0.228 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 17 | 9017 | 1.0785E+03 | 1.18E-09 | 32.841 | 5.227 | 0.191 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 91.8 |
| 18 | 9018 | 1.3631E+03 | 2.27E-07 | 36.920 | 5.876 | 0.170 | 0.000 | 0.0 | 0.3 | 0.0 |
| 19 | 9019 | 1.4235E+03 | 3.94E-07 | 37.730 | 6.005 | 0.167 | 0.000 | 0.3 | 0.0 | 0.0 |
| 20 | 9020 | 1.8491E+03 | 1.98E-08 | 43.001 | 6.844 | 0.146 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.2 |
| 21 | | 2.0383E+03 | 3.34E-06 | 45.148 | 7.186 | 0.139 | | | | |
| 22 | | 2.7339E+03 | 1.47E-07 | 52.286 | 8.322 | 0.120 | | 99.4 | 99.4 | 92.0 |

3.4.1 pav. Svyravimo modų charakteristikos bokštui su X formos ryšiais

Matyti, kad įvedus ryšius virpesių forma ir periodas ženkliai skiriasi nuo modelio be ryšių dėl pasikeitusio standumo, kurį padidino atsiradę ryšiai. Svyravimo periodai gaunami beveik vienodi $T_{ox} = 0,754 s$ ir $T_{oy} = 0,748 s$. Konstrukcijos darbas matomas 3.4.2 ir 3.4.3 pav. Konstrukcijai judant tam tikros ašies kryptimi, daugiausiai įrašų perima ryšiai esantys konstrukcijos judėjimo plokštumoje.

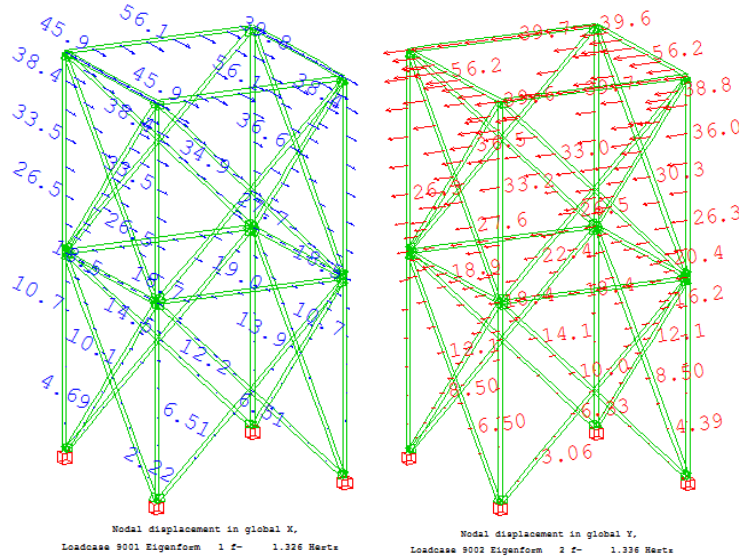


3.4.2 pav. Pirmoji moda (x kryptis) ir antroji moda (y kryptis) – 3D vaizdas



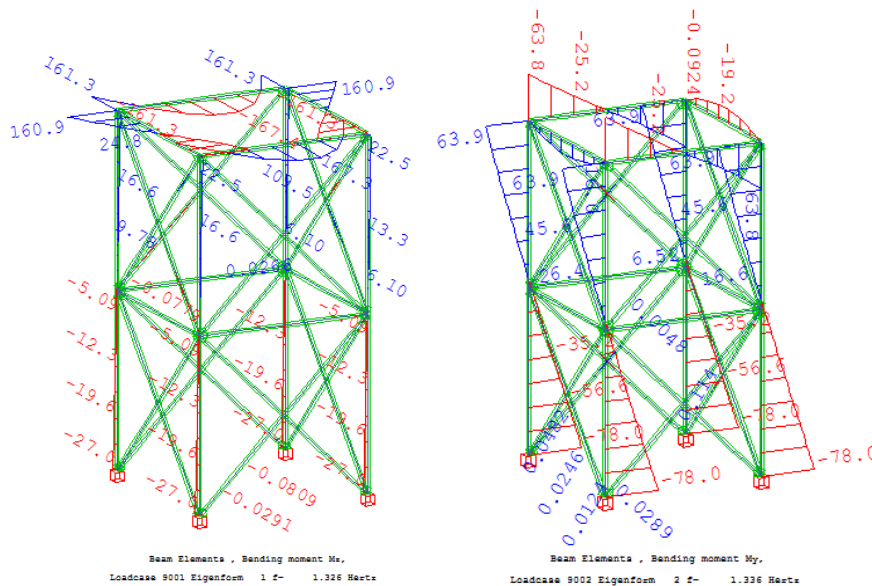
3.4.3 pav. Pirmoji moda (x kryptis) ir antroji moda (y kryptis) – vaizdas iš viršaus

Lyginant bokšto viršūnės poslinkius (3.4.4 pav.), gaunami mažesni bokšto viršaus poslinkiai atitinkamai x ir y kryptimis $u_x = 39,8 \text{ mm}$ ir $u_y = 39,7 \text{ mm}$.



3.4.4 pav. Konstrukcijos poslinkiai x ir y kryptimis atitinkamų modų atvejais

Lenkimo momentai atsirandantys dėl veikiančių seisminių jėgų pateikiami 3.4.5 pav.



3.4.5 pav. Konstrukcijos maksimalūs lenkimo momentai x ir y kryptimis

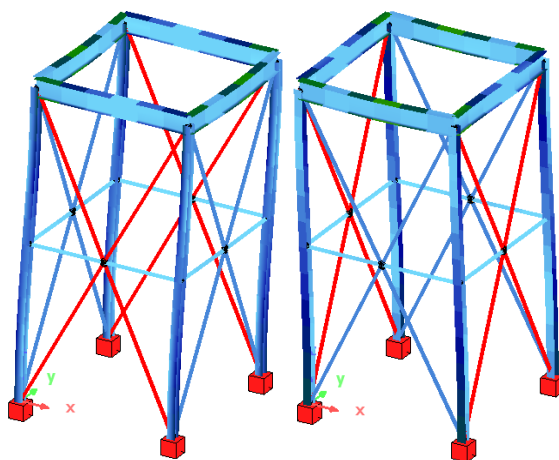
3.5. Bokšto konstrukcija su V formos ryšiais

Bokštui su V formos ryšiais svyravimo modų charakteristikos pateikiamos 3.5.1 pav.

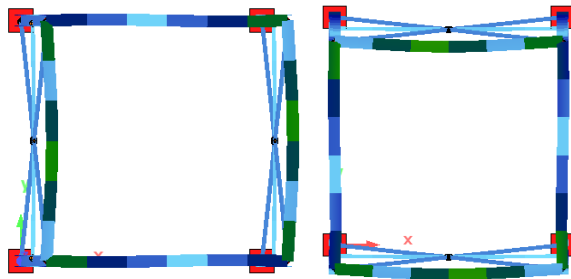
| No. | LC | Eigenvalue [1/sec ²] | relative Error | omega [1/sec] | frequency [Hertz] | period [sec] | Damping D[%] | f-XX [%] | f-YY [%] | f-ZZ [%] |
|-----|------|-------------------------------------|-------------------|------------------|----------------------|-----------------|-----------------|-------------|-------------|-------------|
| 1 | 9001 | 4.2060E+01 | 0.00E+00 | 6.485 | 1.032 | 0.969 | 0.000 | 98.7 | 0.0 | 0.0 |
| 2 | 9002 | 4.3445E+01 | 0.00E+00 | 6.591 | 1.049 | 0.953 | 0.000 | 0.0 | 98.6 | 0.0 |
| 3 | 9003 | 7.2728E+01 | 0.00E+00 | 8.528 | 1.357 | 0.737 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 4 | 9004 | 9.2757E+01 | 0.00E+00 | 9.631 | 1.533 | 0.652 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 5 | 9005 | 1.1209E+02 | 0.00E+00 | 10.587 | 1.685 | 0.593 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 6 | 9006 | 4.4663E+02 | 0.00E+00 | 21.134 | 3.364 | 0.297 | 0.000 | 0.7 | 0.0 | 0.0 |
| 7 | 9007 | 4.4768E+02 | 0.00E+00 | 21.158 | 3.367 | 0.297 | 0.000 | 0.0 | 0.7 | 0.0 |
| 8 | 9008 | 5.5504E+02 | 0.00E+00 | 23.559 | 3.750 | 0.267 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 9 | 9009 | 6.1848E+02 | 0.00E+00 | 24.869 | 3.958 | 0.253 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 10 | 9010 | 6.1873E+02 | 0.00E+00 | 24.874 | 3.959 | 0.253 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 11 | 9011 | 6.1926E+02 | 0.00E+00 | 24.885 | 3.961 | 0.252 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 12 | 9012 | 6.1927E+02 | 0.00E+00 | 24.885 | 3.961 | 0.252 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 13 | 9013 | 1.1320E+03 | 0.00E+00 | 33.645 | 5.355 | 0.187 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 90.7 |
| 14 | 9014 | 1.3549E+03 | 0.00E+00 | 36.808 | 5.858 | 0.171 | 0.000 | 0.0 | 0.1 | 0.0 |
| 15 | 9015 | 1.4155E+03 | 0.00E+00 | 37.624 | 5.988 | 0.167 | 0.000 | 0.1 | 0.0 | 0.0 |
| 16 | 9016 | 1.8475E+03 | 7.98E-10 | 42.983 | 6.841 | 0.146 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.2 |
| 17 | 9017 | 1.9720E+03 | 1.28E-06 | 44.407 | 7.068 | 0.141 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 18 | 9018 | 1.9731E+03 | 5.37E-05 | 44.420 | 7.070 | 0.141 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 19 | 9019 | 1.9749E+03 | 1.01E-05 | 44.440 | 7.073 | 0.141 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 20 | 9020 | 1.9761E+03 | 6.76E-07 | 44.453 | 7.075 | 0.141 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 21 | | 1.9768E+03 | 4.64E-07 | 44.461 | 7.076 | 0.141 | | | | |
| 22 | | 1.9822E+03 | 2.08E-04 | 44.522 | 7.086 | 0.141 | | 99.5 | 99.5 | 91.0 |

3.5.1 pav. Svyravimo modų charakteristikos bokštui su V formos ryšiais

V tipo ryšiai, panašiai kaip ir X formos ryšiai, padidino visos konstrukcijos standumą. Tačiau svyravimo periodai gaunami šiek tiek didesni nei konstrukcijos su X formos ryšiais - $T_{ox} = 0,969$ s ir $T_{oy} = 0,953$ s. Konstrukcijos darbas matomas 3.5.2 ir 3.5.3 pav.

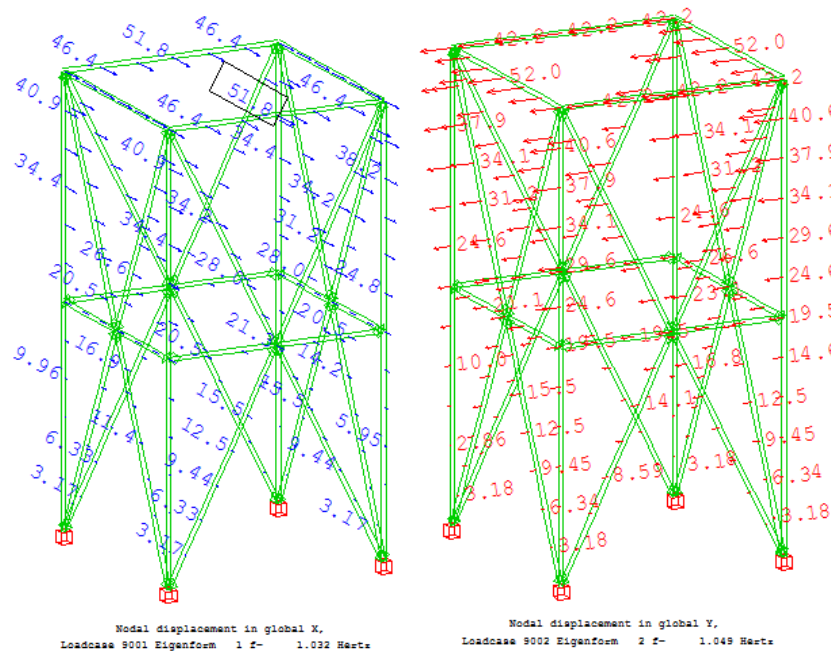


3.5.2 pav. Pirmoji moda (x kryptis) ir antroji moda (y kryptis) – 3D vaizdas



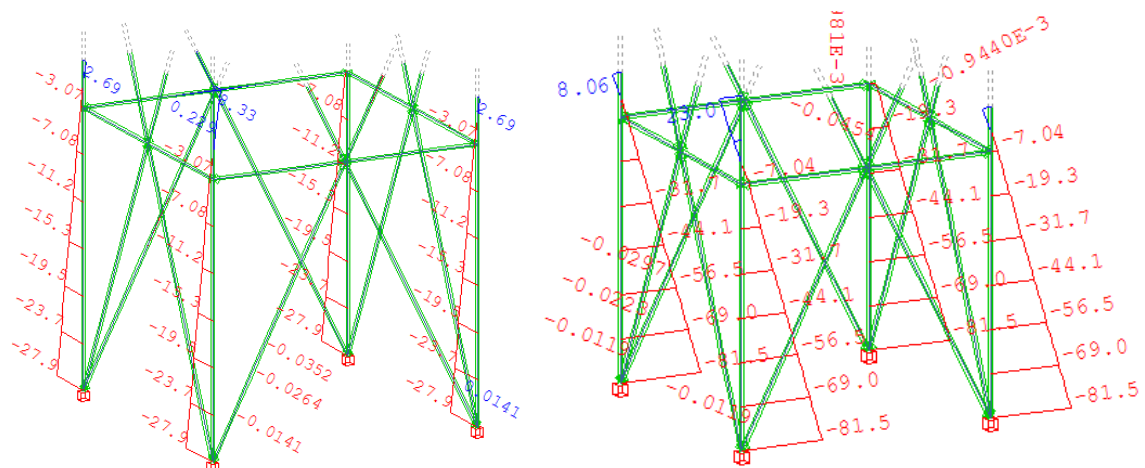
3.5.3 pav. Pirmoji moda (x kryptis) ir antroji moda (y kryptis) – vaizdas iš viršaus

Lyginant bokšto viršūnės poslinkius (3.5.4 pav.), gaunami mažesni bokšto viršaus poslinkiai atitinkamai x ir y kryptimis $u_x = 46,4$ mm ir $u_y = 42,2$ mm.



3.5.4 pav. Konstrukcijos poslinkiai x ir y kryptimis atitinkamų modų atvejais

Lenkimo momentai



3.5.5 pav. Konstrukcijos maksimalūs lenkimo momentai x ir y kryptimis

4. REZULTATŲ ANALIZĖ

4.1. Skaičiavimų rezultatai

Visų skaičiavimų pagrindiniai rezultatai pateikiami 4.1.1 lentelėje. Pagrindiniai rezultatai, kurie bus naudojami analizei – konstrukcijos svyravimo periodai T , bokšto viršaus poslinkiai u ir kolonų ties pagrindu lenkimo momentai M atsiradę dėl seisminio poveikio.

4.1.1 lentelė. Rezultatų suvestinė

| | | k, N/cm | w, rad/s | f, Hz | T, s | u, mm | M, kNm |
|----------------------|----------|----------------|-----------------|--------------|-------------|--------------|---------------|
| Ranka | x | 312.193 | 1.249 | 0.199 | 5.02 | 46 | 43.74 |
| | y | 134.604 | 2.142 | 0.341 | 2.93 | 46 | 81.42 |
| SOFISTIK Be ryšių | x | - | 1.004 | 0.160 | 6.26 | 45.2 | 33.60 |
| | y | - | 1.688 | 0.269 | 3.72 | 45.2 | 95.60 |
| SOFISTIK Ryšiai X | x | - | 8.332 | 1.326 | 0.75 | 38.4 | 27.00 |
| | y | - | 8.395 | 1.336 | 0.75 | 39.7 | 78.00 |
| SOFISTIK Ryšiai V | x | - | 6.485 | 1.032 | 0.97 | 46.4 | 27.90 |
| | y | - | 6.591 | 1.049 | 0.95 | 42.2 | 81.50 |

4.2. Grafinis rezultatų palyginimas

Pirmiausiai lyginame pagrindines konstrukcijos virpesių charakteristikas – svyravimų periodus, kurie pateikiami x ir y kryptimis atitinkamai 4.2.1 ir 4.2.2 lentelėse.

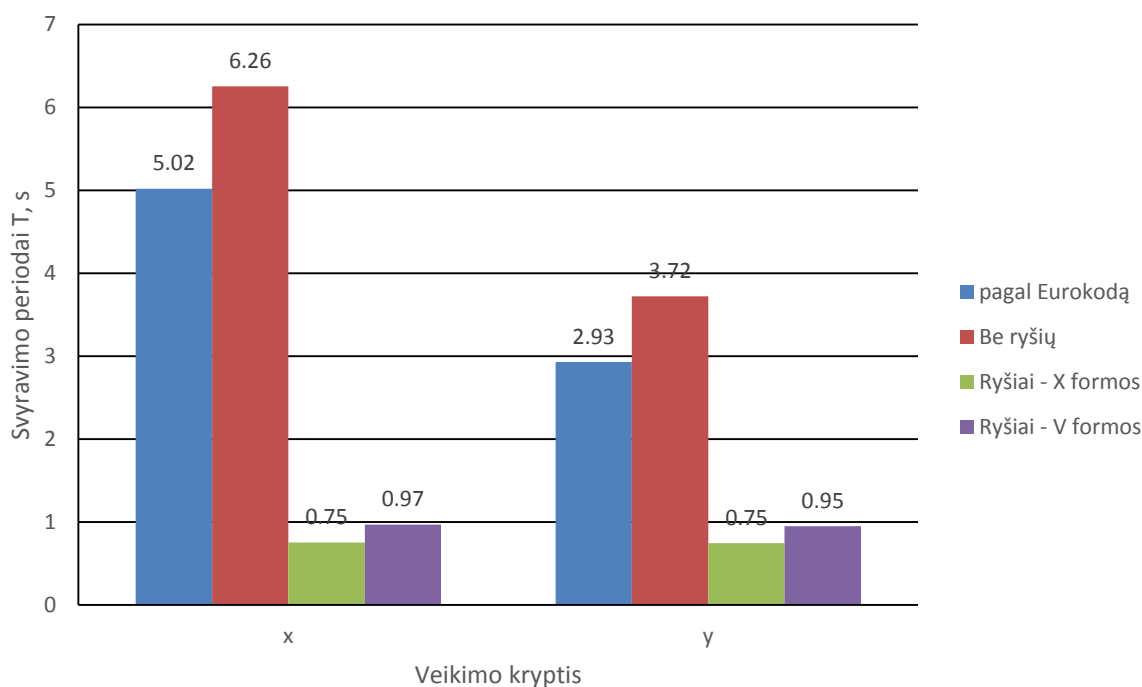
4.2.1 lentelė. Bokšto konstrukcijų svyravimo periodai x ašies kryptimi

| x ašis | pagal Eurokodą | Be ryšių (T_0) | Ryšiai X | Ryšiai V |
|---------------------------|-----------------------|------------------------------------|-----------------|-----------------|
| T, s | 5.02 | 6.26 | 0.75 | 0.97 |
| T/T_0 | 0.80 | 1.00 | 0.12 | 0.15 |

4.2.2 lentelė. Bokšto konstrukcijų svyravimo periodai y ašies kryptimi

| y ašis | pagal Eurokodą | Be ryšių (T_0) | Ryšiai X | Ryšiai V |
|---------------------------|-----------------------|------------------------------------|-----------------|-----------------|
| T, s | 2.93 | 3.72 | 0.75 | 0.95 |
| T/T_0 | 0.79 | 1.00 | 0.20 | 0.26 |

Visi rezultatai lyginami su konstrukcija sumodeliuota programoje ir jos periodu T_0 . Pirmiausiai lyginant su skaičiavimais pagal Eurokodą matyti, kad abejomis kryptimis svyravimo periodai gaunami apie 20% mažesni skaičiuojant pagal normas. Į konstrukciją įvedus ryšius svyravimų periodas smarkiai sumažėja ir gaunami 74-88% mažesni negu konstrukcijos be ryšių. Taipogi matyti, kad abejomis kryptimis periodai kiekvienu ryšių atveju yra beveik lygūs (X formos ryšių $T=0,75s$, o V formos ryšių $T=0,95-0,97$). Rezultatai grafiškai pateikiami 4.2.1 pav.



4.2.1 pav. Svyravimo periodų palyginimas

Lyginami bokšto viršaus poslinkiai, kurie pateikiami x ir y kryptimis atitinkamai 4.2.3 ir 4.2.4 lentelėse.

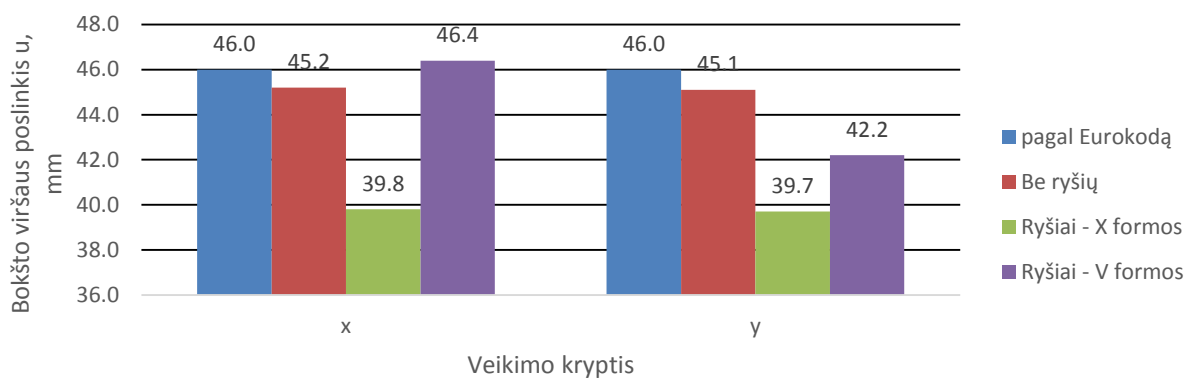
4.2.3 lentelė. Bokšto viršaus poslinkiai x ašies kryptimi

| x ašis | pagal Eurokodą | Be ryšių (u_0) | Ryšiai X | Ryšiai V |
|----------|----------------|--------------------|----------|----------|
| u, mm | 46.0 | 45.20 | 39.80 | 46.40 |
| u/ u_0 | 1.02 | 1.00 | 0.88 | 1.03 |

4.2.4 lentelė. Bokšto viršaus poslinkiai y ašies kryptimi

| y ašis | pagal Eurokodą | Be ryšių (u_0) | Ryšiai X | Ryšiai V |
|----------|----------------|--------------------|----------|----------|
| u, mm | 46.0 | 45.10 | 39.70 | 42.20 |
| u/ u_0 | 1.02 | 1.00 | 0.88 | 0.94 |

Lyginant poslinkius konstrukcijai be ryšių pirmiausiai galima pastebėti, kad poslinkiai skirtingomis kryptimis yra praktiškai vienodi. Rezultatai skaičiuojant pagal normas gaunami, 2% didesni. Įvedus X formos ryšius poslinkiai sumažėja apie 12%, o su V formos ryšiais poslinkiai šiek tiek sumažėja y kryptimi 6%, tačiau x ašies kryptimi poslinkiai didesni nei konstrukcijos be ryšių 3%. Rezultatai grafiškai pateikiami 4.2.2 pav.



4.2.2 pav. Bokšto viršaus poslinkių palyginimas

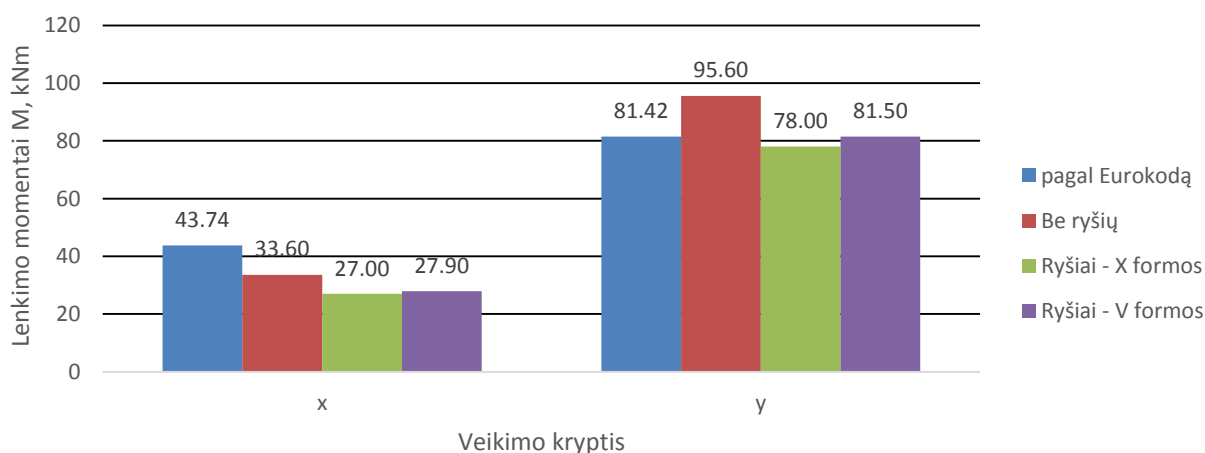
Lyginant lenkimo momentus (4.2.5 ir 4.2.6 lent.) galima pastebėti, kad skaičiuojant pagal normas x ašies kryptimi gaunamas 30% didesnis lenkimo momentas, o y ašies kryptimi 15% mažesnis. Taip gali gautis dėl kelių priežasčių – skaičiuojamųjų schemų (modelių) neatitikimo ir/arba skaičiuojant pagal normas naudojami koeficientai iš dalies neatitinka realių sąlygų, kurios gaunamos tikslesnės modeliujant programa. Įvedus ryšius pastebimas lenkimo momentų sumažėjimas. Rezultatai grafiškai pateikiami 4.2.3 pav.

4.2.5 lentelė. Bokšto kolonų pagrindus veikiantys lenkimo momentai x ašies kryptimi

| x ašis | pagal Eurokodą | Be ryšių (M_0) | Ryšiai X | Ryšiai V |
|----------|----------------|--------------------|----------|----------|
| M, kNm | 43.74 | 33.60 | 27.00 | 27.90 |
| M/ M_0 | 1.30 | 1.00 | 0.80 | 0.83 |

4.2.6 lentelė. Bokšto kolonų pagrindus veikiantys lenkimo momentai y ašies kryptimi

| y ašis | pagal Eurokodą | Be ryšių (M_0) | Ryšiai X | Ryšiai V |
|----------|----------------|--------------------|----------|----------|
| M, kNm | 81.42 | 95.60 | 78.00 | 81.50 |
| M/ M_0 | 0.85 | 1.00 | 0.82 | 0.85 |



4.2.3 pav. Bokšto lenkimo momentų ties pagrindu palyginimas

4.3. Išvados

Darbui apibendrinti padaromos šios išvados:

- 1) Skaičiuojant pagal normas savieji virpesių periodai gaunami apie 20% mažesni ($T_{ox} = 5,02$ s ir $T_{oy} = 2,93$ s) nei suskaičiavus programa ($T_{ox} = 6,26$ s ir $T_{oy} = 3,72$ s). Tai galima pagrįsti tuo, kad skaičiuojant pagal normas bokšto viršutinis diskas priimamas kaip visiškai standi dalis, o kolonos skaičiuojamos kaip vienas elementas, kai tuo tarpu programos modelyje bokšto viršutinį diską sudaro sijos, kurios turi savo standumus ir yra įtakojamos virpesių. Periodai skirtingomis kryptimis skiriasi dėl bokšto kolonų inercijos momentų nevienodumo.
- 2) Įvedus į konstrukciją ryšius (padidinus jos standumą), pastebimas ženklus svyravimų periodo sumažėjimas – esant X formos ryšiams $T_{ox} = 0,75$ s ir $T_{oy} = 0,75$ s, o V formos ryšiams $T_{ox} = 0,97$ s ir $T_{oy} = 0,95$ s. Taipogi galima pastebėti, kad periodai beveik suvienodėjo abiem kryptimis dėl įvestų simetriškų ryšių.
- 3) Bokšto konstrukcijos be ryšių viršaus poslinkiai, esant skirtingiems standumams, nesiskiria arba skiriasi nedaug. Tai įtakoja sąlyginai dideli virpesių periodai. Įvedus ryšius periodai sumažėja, tačiau dėl jų padidėja standumas ir galutiniam rezultate gauname beveik vienodus poslinkius.
- 4) Lyginant lenkimo momentus tenkančius vienai kolonai, konstrukcijoje be ryšių x ašies kryptimi gauname 33,6 kNm, o įvedę X ir V formos ryšius atitinkamai gauname 27,0 ir 27,9 kNm, t.y. 20% ir 17% mažesnius lenkimo momentus. O y ašies kryptimi konstrukcijai be ryšių 95,6 kNm, įvedus ryšius 78,0 ir 81,5 kNm, t.y. 18% ir 15% mažesnius lenkimo momentus.
- 5) Ryšiai bokšto konstrukciją sustandina, sumažina jos svyravimų periodą bei lenkimo momentus veikiančius koloną. Tačiau reikia atkreipti dėmesį į ryšių išdėstymą, nes neteisingas jų pozicionavimas gali netgi padidinti konstrukcijos elementų poslinkius.

LITERATŪRA

1. V. Kargaudas, R. Vaičaitis „Konstrukcijų virpesiai“. Kaunas: Technologija, 2014.
2. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1 : General rules, seismic actions and rules for buildings.
3. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance -Part 6: Towers, masts and chimneys.
4. A. K. Chopra „Dynamics of Structures Theory and Applications to Earthquake Engineering“. Prentice Hall, New Jersey, 2012.
5. P.S. Sutar, S.C. Potnis „Earthquake response of the liquid storage tank with various isolation systems: State-of-the-Art Review“. Prieiga per internetą [žiūrėta 2015-05-17]:
<http://www.ijaiem.org/volume2issue11/IJAIEM-2013-10-08-005.pdf>
6. Y. Sato, T. Ishikawa „Earthquake resistance of transmission steel towers“. Prieiga per internetą [žiūrėta 2015-05-17]:
http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_3142.pdf
7. A. Adnan, M. Vafaei, A.K. Mirasa „Linear and Nonlinear Seismic Analysis of a Tall Air Traffic Control (ATC) Tower. Prieiga per internetą [žiūrėta 2015-05-17]:
http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_1235.pdf
8. Kompiuterinių programų paketas (mokomoji versija) „SOFiSTiK“. Prieiga per internetą:
<http://www.sofistik.com/en/>
9. Programos „SOFiSTiK“ mokomosios medžiagos šaltinis „Infoportal“. Prieiga per internetą:
<http://www.sofistik.com/en/infoportal/>