



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS**

Mantas Čiužas

Gelžbetoninių liktinių klojinių su standžia armatūra tyrimai

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Mindaugas Augonis

KAUNAS, 2018



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS**

Gelžbetoninių liktinių klojinių su standžia armatūra tyrimai

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

(parašas) Doc.dr. Mindaugas Augonis
(data)

Recenzentas

(parašas) Dr. Šarūnas Kelpša
(data)

Projektą atliko

(parašas) Mantas Čiužas
(data)

KAUNAS, 2018

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS

(Fakultetas)

Mantas Čiužas

(Studento vardas, pavardė)

Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (kodas6211EX008)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Gelžbetoninių liktinių klojinių su standžia armatūra tyrimai“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 ____ m. _____ d.

Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Manto Čiužo**, baigiamasis projektas tema „Gelžbetoninių liktinių klojinių su standžia armatūra tyrimai“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

TURINYS

ĮVADAS	10
Literatūros analizė.....	12
1 KOMPOZITINĖ PERDANGA SU PROFILIUOTU PAKLOTU	14
1.1 Kompozitinės plokštės su profiliuotu paklotu skaičiavimas	16
1.2 Pirma stadija	19
1.2.1 Atsparumas lenkimui	19
1.2.2 Atsparumas vertikaliajam kirpimui	19
1.2.3 Įlinkis	20
1.3 Antra stadija.....	20
1.3.1 Atsparumas lenkimui	21
1.3.2 Vertikalus kirpimas	21
1.3.3 Horizontalus kirpimas	22
1.3.4 Įlinkis	23
1.3.5 Pleišėjimas	25
1.3.6 Rezultatai	26
2. KOMPOZITINĖS PERDANGOS SU ĮBETONUOTA PLIENINE SIJA	28
2.1 Pirma stadija	30
2.1.1 Atsparumas lenkimui	31
2.1.2 Atsparumas kirpimui.....	33
2.1.3 Įlinkio skaičiavimas	33
2.1.4 Atsparumas pleišėjimui.....	35
2.1.5 Plyšio pločio skaičiavimas	36
2.2 Antra stadija.....	37
2.2.1 Atsparumas lenkimui	38
2.2.2 Atsparumas kirpimui.....	38
2.2.3 Įlinkio skaičiavimas	38
2.2.4 Rezultatai	41
2.2.5 Rezultatai, kai pirmoje stadijoje neleidžiamas plyšys	41
3. KOMPOZITINĖS PLOKŠTĖS SU PUSIAU ĮBETONUOTAIS PLIENO PROFILIAIS	42
3.1 Pirma stadija	43
3.1.1 Atsparumas lenkimui:	44
3.1.2 Atsparumas kirpimui.....	45
3.1.3 Įlinkio skaičiavimas	46
3.1.4 Atsparumas pleišėjimui.....	47
3.1.5 Plyšio pločio skaičiavimas	47
3.2 Antra stadija.....	49
3.2.1 Atsparumas lenkimui	49

3.2.2	Atsparumas kirpimui.....	50
3.2.3	Įlinkio skaičiavimas	50
3.2.4	Rezultatai	52
3.2.5	Rezultatai, kai pirmoje stadijoje neleidžiamas plyšys	53
4.	KIAURYMĖTA PERDANGOS PLOKŠTĖ	54
5.	PALYGINIMAS	55
5.1	Mechaninės savybės.	55
5.2	Ekonominis palyginimas	57
	IŠVADOS	59
	LITERATŪRA	60

Paveikslėlių sąrašas

1.1 pav. Kompozitinės plokštės skaičiuojamoji schema.....	17
1.2 pav. Kompozitinės perdangos su profiliuotu paklotu „Comflor 225“ skerspjūvis	18
2.1 pav. Skaičiuojamos konstrukcijos skerspjūvis.....	29
2.2 pav. Pirmos stadijos skaičiuotinė schema	31
2.3 pav. Antros stadijos skaičiuotinė schema	38

Lentelių sąrašas

1.1 lentelė. Apkrovos	18
1.2 lentelė. Pirmos konstrukcijos mechaninės savybės	26
1.3 lentelė. Pirmos konstrukcijos medžiagų kiekiai ir jų kainos	26
1.4 lentelė. Pirmos konstrukcijos mechaninės savybės apskaičiuotos „ComFlor 9” programa	26
1.5 lentelė. skaičiavimų programa „Comflor 9" ir skaičiavimų ranka palyginimas	27
2.1 lentelė. Antros konstrukcijos mechaninės savybės.....	41
2.2 lentelė. Antros konstrukcijos medžiagų kiekiai ir jų kainos.....	41
2.3 Antros konstrukcijos, be plyšių, mechaninės savybės	41
2.4 Antros konstrukcijos, be plyšių, medžiagų kiekiai ir jų kainos	41
3.1 lentelė. Apkrovos	43
3.2 lentelė. Trečios konstrukcijos mechaninės savybės.....	52
3.3 lentelė. Trečios konstrukcijos medžiagų kiekiai ir jų kainos.....	52
3.4 Trečios konstrukcijos, be plyšių, mechaninės savybės.....	53
3.5 Trečios konstrukcijos, be plyšių, medžiagų kiekiai ir jų kainos.....	53
5.1 lentelė. Kompozitinių konstrukcijų mechaninių savybių palyginamoji lentelė.....	55
5.2 lentelė. Kompozitinių konstrukcijų mechaninių savybių palyginamoji lentelė, kai 2 ir 3 konstrukcijos be plyšių.....	56
5.3 lentelė. Konstrukcijų medžiagų kiekių ir jų kainų palyginamoji lentelė	57

Čiužas Mantas. Gelžbetoninių liktinių klojinių su standžia armatūra tyrimai. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Mindaugas Augonis: Kauno Technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas, Statybinės konstrukcijos ir gaminių inžinerija.

Mokslo kryptis ir sritis: Statybinių konstrukcijų mokslai, Statybos inžinerija.

Reikšminiai žodžiai: kompozitinė perdanga, plienbetonis, liktinis klojinys.

Kaunas, 2018. 61 p.

SANTRAUKA

Statybos pramonėje daug dėmesio skiriama efektyvių konstrukcinių sprendimų paieškai, siekiant užtikrinti didesnę statybinių konstrukcijų stiprumą, patikimumą ir ilgaamžiškumą. Pramonėje dažniausiai naudojami betoniniai gaminiai, kurie yra armuojami plienine armatūra, tokiu atveju armatūra laiko tempimo jėgas, o betonas laiko gniuždymo jėgas. Tačiau, siekiant konstrukcijai suteikti didesnę standumą, sumažinti įlinkius ir padidinti įstrižojo pjūvio stiprumą, betonines konstrukcijas galima armuoti ir standžia armatūra, darbe nagrinėjamu atveju dvitėjine plienine sija.

Nagrinėjama kompozitinė perdangos plokštė susideda iš dviejų skirtingu metu sukietėjusio betono sluoksnių ir turi įbetonuotą dvitėjinį plieno profilį. Pirmasis betono sluoksnis yra gaminamas gamykloje, jis turi įbetonuotą plieninę siją ir montavimo metu dirba kaip liktinis klojinys. Antras betono sluoksnis yra pilamas statybos aikštelėje ir jam sukietėjus visa konstrukcija dirba kaip vientisas elementas. Gelžbetoninė plokštė su standžia armatūra ir liktiniais klojiniais yra ekonomišką sprendimas konstrukcijoms, kurios reikalauja didelio stiprumo ir standumo, siekiant sumažinti gamybos ir montavimo kaštus.

Šiame darbe nagrinėjami du kompozitinių plokščių su įbetonuota plienine sija variantai. Analizuojama konstrukcijos medžiagų ir montavimo kaina. Visi mechaninių savybių ir kainų rezultatai lyginami su apskaičiuota profiliuoto pakloto kompozitine perdanga bei su gamintojo pateiktomis kiaurymėtos perdangos plokščių savybėmis.

Čiužas Mantas. Investigation of stay – in – place formworks with rigid reinforcement / supervisor Doc. Dr. Mindaugas Augonis: Kaunas University of Technology, faculty of civil engineering and architecture, Structural and Building Products Engineering.

Field of study: Construction, Civil engineering.

Key words: composite slab, concrete encased steel beam, permanent formwork.

Kaunas, 2018. 61 p.

SUMMARY

The construction industry is focusing on finding efficient structural solutions to ensure greater strength, reliability and durability of building structures. In the industry most commonly used are concrete products that are reinforced with steel rebar, in which case the reinforcement takes tensile forces and the concrete withstands compressive forces. However, in order to provide a greater stiffness, reduce deflections and increase the strength of the vertical shear, concrete structures can also be reinforced with rigid reinforcement, in the case under consideration, I – beam.

The composite slab, which is under consideration, consists of two concrete layers cast at different times and encased steel beam. First layer of concrete is manufactured in a factory, it has encased steel beam and are made as permanent formwork. The second concrete layer is cast on site and after hardening the entire structure works as a solid element. Reinforced concrete slab with rigid reinforcement and permanent formwork is an economical solution for structures that require high strength and stiffness, when trying to reduce production and installation costs.

In this work two variants of composite slabs with encased steel beam are being examined. The cost of materials and construction is analyzed. All results of mechanical properties and prices are compared with properties of the calculated composite slab with profiled sheeting and the properties provided by the manufacturer of the hollow core slabs.

IVADAS

Pastatų ir tiltų konstrukcijų projektavime daug dėmesio skiriama apkrovas laikančių horizontalių konstrukcijų stiprumo ir stabilumo užtikrinimui. Skiriamas didelis dėmesys statybos būdams lemiantiems montavimo greičiui, darbų lankstumą, konstrukcijų pritaikomumą ir išnaudojimą įvairiems poreikiams. Siekiama sumažinti medžiagų kiekius ir padidinti statinių pritaikomumą, didinant perdangų plotus ir mažinant kolonų bei atraminių pertvarų skaičių [14]. Itin svarbu rasti tokią perdangą, kuri būtų optimaliai išnaudojama ir sumažintų gamybos bei montavimo kaštus. Šiuo projektu siekiama rasti alternatyvą padedančią pasiekti šiuos tikslus.

Darbo aktualumas. Pastaraisiais metais Vakarų Europoje plinta modernios, ekonomiškos ir technologiškos surenkamosios monolitinės perdangos, tarp jų ir perdangos su liktiniais gelžbetonio klojiniais. Surenkamųjų monolitinių perdangų techninis ir ekonominis pranašumas tampa akivaizdus, kai pasirenkamas sparčios ir racionalios statybos būdas. Naudojant vien surenkamąsias konstrukcijas, jų matmenys turi būti tikslūs. O surenkamoji monolitinė perdangos konstrukcija apima surenkamųjų ir monolitinių konstrukcijų pranašumus. Praktiškai jos tinka visur, kur naudojamas gelžbetonis. Šių konstrukcijų sėkmę lėmė techninių sprendimų lankstumas, didelis ekonomiškumas ir mažos laiko sąnaudos statyboje. Deja, dvisluoksnės plokštės su liktiniais gelžbetonio klojiniais Lietuvoje mažai žinomos ir kol kas dar nenaudojamos [15]. Pasaulyje perdangos plokštės su įbetonuota plienine sija yra naudojamos tiltų statyboje, siekiant padidinti konstrukcijos standumą, atsparumą dinaminėms apkrovoms ir sumažinti įlinkius, tačiau pastatų statyboje tokios konstrukcijos yra rečiau naudojamos, jos gali būti gaminamos tais atvejais, kai reikia sumažinti konstrukcijos įlinkį ir padidinti įstrižo pjūvio stiprumą, nedidinant perdangos aukščio.

Tyrimo problema. Horizontalios konstrukcijos dažniausiai gaminamos iš gelžbetonio, dėl žemesnės kainos, pakankamo stiprumo, atsparumo korozijai ir ugniai, tačiau didinant gelžbetoninės konstrukcijos aukštį – mažėja pastato aukščio išnaudojimas ir didėja apkrovos į pamatus. Tokia konstrukcija tampa masyvi, reikalauja daug žmogaus darbo ir laiko statybos metu.

Statinio statybos terminas yra stipriai įtakojamas laiko, kuris reikalingas pastatyti tipines monolitines pastato perdangas, o kompozitinės betono konstrukcijos su liktiniais klojiniais šioje vietoje turi privalumų, kadangi liktiniai klojiniai su plienino konstrukcija savo laikomąją galią turi vos tik sumontuotos. Daug laiko gali būti sutaupyta, montuojant tokias plokštes, kadangi liktinis klojinys dirba kaip darbo aikštelė, o viršutiniam betonui sukietėjus – kaip apatinis perdangos armavimas.

Įprastoje gelžbetoninėje konstrukcijoje betonai dirba tik gniuždymui, o plieninė armatūra perima tempimo jėgas. Kompozitinėje konstrukcijoje plienas ir betonai sukomponuoti taip, kad būtų efektyviai išnaudojamos abiejų medžiagų savybės. Įbetonuotos plieninės sijos konstrukcijoje,

betonas užtikrina atsparumą ugniai ir padidina skerspjūvio standumą dėl kurio padidėja konstrukcijos laikomoji galia ir sumažėja reikalingas skerspjūvio aukštis [13].

Liktinio klojinio tipo kompozitinė perdanga apjungia gamykloje suformuotų perdangos plokščių ir monolitinių objekte formuojamų perdangų privalumus. Tokių plokščių panaudojimas rekomenduojamas tada, kai įprastinių kiaurymėtu perdangos plokščių pasirinkimas kelia problemų. Pavyzdžiui, tuo atveju, kai perdengimas reikalauja didelių angų, esant didelėms taškinėms apkrovoms, įrengiant po grindimis įvairias komunikacijas, nesuderinamas su kiaurymėtu ar monolitinių perdangų panaudojimu, siekiant sumažinti bendrą lubų storį, norint padidinti garso izoliaciją nedidinant bendro konstrukcijos storio, derinant su kitomis monolitinėmis konstrukcijomis [11].

Tyrimo tikslas. Išnagrinėti surenkamos - monolitinės perdangos, su standžia armatūra privalumus ir trūkumus (konstrukcinius ir ekonominius) lyginant ją su plieninio profiliuoto liktinio klojinio gelžbetonine monolitine perdanga bei su surenkama kiaurymėta gelžbetonine perdanga.

Darbo uždaviniai:

1. Apžvelgti kompozitinių perdangų ypatumus ir skaičiavimo metodus.
2. Apskaičiuoti kompozitinę perdangą su plieniniu profiliuotu paklotu ir palyginti skaičiavimus su rezultatais gautais skaičiuojant „Comfor 9“ programa.
3. Apskaičiuoti gelžbetoninių liktinių klojinių su standžia armatūra du variantus: kai į liktinį klojinį yra pilnai įbetonuota viena plieninė sija ir kai į liktinį klojinį yra pusiau įbetonuotos dvi plieninės sijos.

Tyrimo metodai. Perdangai su įbetonuota plienine sija sukurtos skaičiavimo specifikos nėra todėl skaičiavimams naudojama įvairi literatūra, tyrimai su betoninėmis sijomis turinčiomis įbetonuotą plieninį profilį ir bendros mechanikos žinios. Projekto tikslams įgyvendinti buvo naudojami įvairūs skaičiavimai atliekami „MS Excel“. Buvo sudaryti du skirtingi perdangų variantai: pirmas variantas - su pilnai įbetonuota plienine sija į liktinį klojinį, antras variantas su pusiau įbetonuota plienine sija į liktinį klojinį ir atlikta šių konstrukcijų mechaninių savybių ir ekonomiško analizė.

Darbo struktūra. Darbas susideda iš keturių nagrinėjamų konstrukcijų. Pirmiausia apskaičiuojama kompozitinė plokštė su liktiniu profiliuotu paklotu, toliau paskaičiuojami du variantai kompozitinės konstrukcijos su įbetonuotomis plieninėmis sijomis. Pirmas variantas turi vieną pilnai įbetonuotą sija, o antras variantas dvi pusiau įbetonuotas plienines sijas. Galiausiai atliekant analizę ir ekonominį palyginimą, į šių konstrukcijų palyginimą įtraukiu ir gamintojo pateiktas kiaurymėtu perdangos plokščių savybes.

LITERATŪROS ANALIZĖ

Šiame darbe nagrinėjama perdanga susideda iš gamykloje pagamintos liktinio klojinio plokštės su įbetonuota plienine sija, kuri dirba kaip standi armatūra ir statybos metu užpilamu monolitiniu betono sluoksniu.

Perdangos projektuojamos XC1 aplinkos poveikio klasei. Konstrukcijų naudojimas atitinka C kategoriją, tai reiškia, kad numatomos 3 kNm² naudojimo apkrovos ir deriniai atitinkantys šią kategoriją pagal EN1990 A1.1 lentelę [10]. Daromos prielaidos, kad yra užtikrinamas pilnas sukibimas tarp skirtingų konstrukcijos sluoksnių ir visos konstrukcijos dirba kaip kompozitas. Perdangos projektuojamos 5500 mm be parėmimų pirmoje stadijoje taip, kad atlaikytų šlapio betono ir darbo apkrovas dar nesukietėjus betonui, antroje stadijoje, sukietėjus betonui perdangos dirba kaip kompozitas ir atlaiko papildomas apkrovas. Visos perdangos skaičiuojamos kaip dviatramės sijos saugos ir tinkamumo ribiniams būviams ir turi tenkinti šių būvių keliaus reikalavimus.

Saugos ribinis būvis

Atsparumas lenkimui skaičiuojamas iš pusiausvyros sąlygos – jėgos gniuždymo zonoje yra lygios jėgoms tempimo zonoje. Pusiausvyros skaičiavimo metodika priimta pagal įbetonuotų plieninių sijų perdangos skaičiavimo metodus, kuriuos pateikė Slovakijos „Žilinia“ universiteto prof. Ján Bujňák.[19].

Kompozitinės perdangos su profiliuotu paklotu vertikalus kirpimas skaičiuojamas pagal EN 1992-1-1 6.2.2. pateiktus nurodymus skerspjūviams be skersinės armatūros [6]. Remiantis Collings, D. (2010), pilnai įbetonuotos plieninės sijos, vertikalus kirpimas skaičiuojamas priimant sąlygą, kad plieninis skerspjūvis perima visą vertikalią kirpimo jėgą, kadangi betoninio elemento atsparumas kirpimui yra santykinai mažas [17], todėl skaičiavimas atliekamas pagal EN 1993-1-1 6.2.6 „plieninių konstrukcijų atsparumas kirpimui“ [5].

Tinkamumo ribinis būvis

Pirmoje stadijoje, kai betonas dar nėra sukietėjęs įlinkis skaičiuojamas remiantis EN 1994-1-1 [1] skyriaus 9.6 nurodymais. Įlinkis δ_1 , skaičiuojamas nuo savojo svorio plius šlapio betono svoris, nevertinant montavimo apkrovų, neturi viršyti $\delta_{max} = \frac{L}{180}$ reikšmės. Skaičiuojant kompozitinės perdangos įlinkį remiamasi Vayas I., Iliopoulos A. „Design of Steel-Concrete Composite Bridges to Eurocodes“ 10.5.2 skyriaus nurodymais ir inercijos momentas I_{eff} skaičiuojamas imant supleišėjusio ir nesupleišėjusio skerspjūvio inercijos momentų vidurkius. Antroje stadijoje įlinkis skaičiuojamas nuo charakteristinių apkrovų, remiantis EN 1992-1-1 skyriaus 7.4.1, punkto 4 nurodymais įlinkis δ_2 neturi viršyti $\delta_{max} = \frac{L}{250}$ reikšmės [6].

Kompozitinių perdangų su profiliuotu paklotu pleišėjimas nėra vertinamas, bet turi būti užtikrinamas minimalus armavimas. Pagal EN 1994-1-1 skyrių 9.8.1 (2) [1] viršutinis armavimas turi

būti ne mažiau nei 0,2% nuo betono skerspjūvio virš profiliuoto pakloto. Perdangose, kurias montuojant naudojami paramstymai – reikalinga ne mažiau nei 0,4%. Tačiau atsparumas pleišėjimui dėl palyginimo yra apskaičiuojamas remiantis STR2-05-05-2005 5 priedą [8]. Lenkiamųjų gelžbetoninių elementų normalinių plyšių atsiradimas tikrinimas pagal sąlygą: $M_{Ed} \leq M_{cr} = f_{ctk} \cdot W_{pl}$. Plyšio plotis w_k apskaičiuojamas skaičiuojamas remiantis EN1992-1-1 7.3.4 [6]

1 KOMPOZITINĖ PERDANGA SU PROFILIUOTU PAKLOTU

Eurokodas EN 1994-1-1:2004 kompozitinę plokštę apibūdina taip: „kompozitinė plokštė yra plokštė, kurioje profiliuotas paklotas naudojamas kaip liktinis klojinys ir sąveikaudamas su betonu, jam sukietėjus dirba kaip tempiama armatūra.“[1].

Kompozitinė plokštė yra apibrėžiama kaip perdangos sistema susidedanti iš normalaus arba lengvo betono, užlieto ant šaltai formuoto plieno pakloto. Šioje konstrukcijoje plieno paklotas atlieka dvi funkcijas, pirmoje stadijoje dirba kaip liktinis klojinys, statybos metu ir antroje stadijoje, kaip tempiama armatūra, sukietėjus betonui.

Tokios plokštės dažniausiai naudojamos rėminiuose konstrukcijose su plieninėmis sijomis. Kompozitinės plokštės yra ypač konkurencingos kai betonines grindis reikia užlieti greitai ir kur nėra reikalingas didelis atsparumas ugniai. Tačiau kompozitinės plokštės yra netinkamos ten kur yra didelės koncentruotos arba dinaminės apkrovos.

Sąlygos kompozitui užtikrinti:

Kompozitinė plokštė turi tenkinti sąlygas pateiktas EN1991-1-1 9.2 [1]:

- a) konstrukcijos sluoksniai dirba kaip kompozitas kartu su plienine sija:
 - plokštės visos aukštis $h_t \geq 90\text{mm}$;
 - betono sluoksnis virš pagrindinio plokščio profiliuoto pakloto paviršiaus $h_c \geq 50\text{mm}$;
- b) minimalus armavimo kiekis turi būti 80mm^2 ;
- c) armatūros žingsnis $s < 2 \cdot h$.

Profiluotas plieno paklotas atlieka kelias funkcijas:

- atlaiko apkrovas statybos metu ir veikia kaip darbo platforma;
- kompozitinėje stadijoje atlaiko papildomas apkrovas;
- paskirsto apkrovas veikdama kaip diafragma;
- stabilizuoja sijų gniuždomą dalį nuo išklupimo;
- sumažina betono poreikį tempiamoje zonoje;
- paskirsto susitraukimo įtempius taip išvengiant pavojingų plyšių atsiradimo.

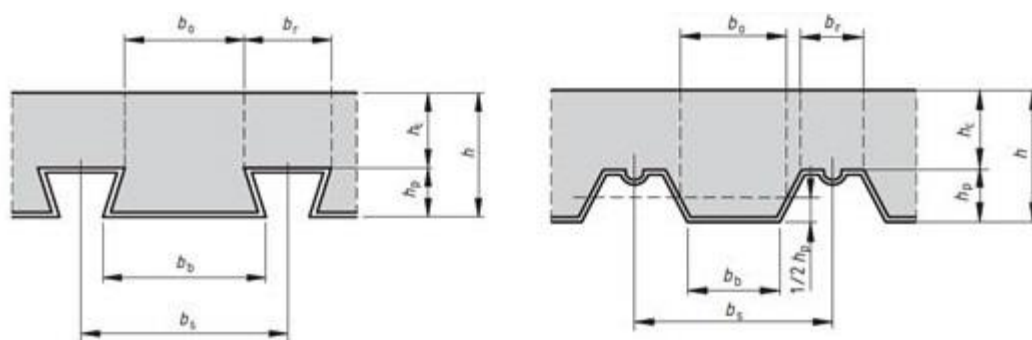
Projektuojant kompozitinę perdangą būtina atsižvelgti į užtvenkimo efektą, kai pilant betoną profiliuotas paklotas įlinksta ir įlinkio vietoje susitelkia daugiau betono. Norint išvengti užtvenkimo efekto, reikia ilgas perdangas pirmoje stadijoje paremti laikinomis atramomis.

Profiluotas paklotas

Yra daug profiliuotų paklotų tipų naudojamų kompozitinėse perdangose. Profiluota plokštė dažniausiai šaltai suformuota iš plieno lakštų ritinių. Profiluotų plokščių matmenys varijuoja: bangų aukštis nuo 54 mm iki 225 mm, atstumas tarp bangų nuo 150 iki 350 mm, o plokštės ilgis yra nuo 6 m iki 12 m, ir plotis – nuo 600 mm iki 1200 mm. Profiluoto pakloto takumo stipris kinta nuo 240 MPa iki 550 MPa, taip pat kinta ir metodai, užtikrinantys mechaninį sukibimą tarp plieno lakšto ir

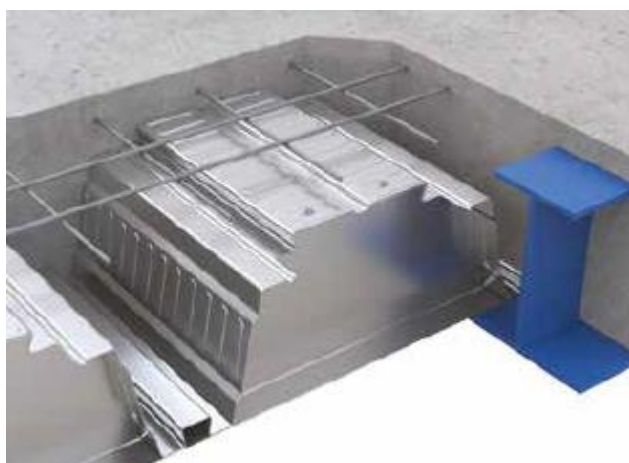
betono paviršių. Plieno paklotas įprastai yra valcuojamas iš 0,9 – 1,5mm cinkuoto plieno lakšto. Egzistuoja du pagrindiniai profiliuotų lakštų tipai [1]:

- apverstos trikampės formos (pav. 1.2 a.);
- trapecinis su įspaudais ir iškilimais (pav. 1.2 b.).



1.1 pav. a) apverstos trikampės formos profiliuotas paklotas, b) trapecinis su įspaudais ir iškilimais profiliuotas paklotas

Darbe naudojamas cinkuotas plieninis profiliuotas paklotas – „ComFlor 225“ su cinko sluoksniu 275g/m². Profiliuotas paklotas užtikrina 350 MPa stiprumą ir yra šaltai formuotas taip, kad optimaliai pasiektų kompozitinę stadiją ir išnaudotų skerspjūvio laikomąją galią bei sumažintų betono sąnaudas tempiamoje zonoje. Profiliuoto pakloto aukštis yra 225 mm, storis 1,25 mm (1.3 pav.).



1.2 pav. Darbe nagrinėjama kompozitinė perdanga su profiliuotu paklotu „ComFlor 225“

Armavimas

Armavimas kompozitinėje plokštėje yra reikalingas, nors ir profiliuotas paklotas dirba kaip tempiama armatūra. Siekiant paskirstyti jėgas, esant koncentruotoms arba linijinėms jėgoms reikalingas armatūros tinklas. Papildomas armavimas reikalingas prie angų, atramų, kur momentas yra neigiamas, susitraukimo įtempių paskirstymui ir dėl atsparumo ugniai užtikrinimo. Aukštuose paklotuose, tokiuose kaip „ComFlor 225“, naudojamas pagrindinis armavimas, kuris dedamas į pakloto apatinę betonuotą dalį. Toks armavimas yra vertinamas saugos ir tinkamumo ribiniuose būviuose.

Apkrovos ir poveikiai

Visos skaičiuojamos saugos ir tinkamumo situacijos turi būti įvertintos, kad būtų užtikrintas pakankamas konstrukcijos saugumas.

Turi būti įvertintos šios situacijos:

- montavimo stadija. Profiliuotas paklotas kaip klojinys ir darbo aikštelė. Profiliuoto pakloto elgsena esant apkrovoms turi būti įvertinta, kai jis dirba kaip klojinys betonui. Skaičiuojant turi būti atsižvelgta užtvenkimo efektą, kai dėl pakloto įlinkio betonas susitelkia per visą pakloto įlinkį;
- kompozitinė stadija. Visi saugos ir tinkamumo reikalavimai turi būti tenkinami, kai betonas sukietėja ir yra nuimti paramstymai [1].

Apkrovos profiliuotam paklotui pirmoje stadijoje, kai jis dirba kaip klojinys:

Apkrovos, kurias reikia įvertinti skaičiuojant paklotą kaip klojinį betonui:

- betono svoris ant profiliuoto pakloto 24 kN/m^3 plus 1 kN/m^3 armavimas ir 1 kN/m^3 kai betonas šlapias, pagal EN 1991-1-1, A.1 lentelę [2];
- montavimo apkrovos $0,75 \text{ kN/m}^2$;
- EN1991-1-6. 4.11.2 [3] išskiria $3 \times 3 \text{ m}$. nepastovios padėties darbinį plotą su papildomu 10% betono svoriu, bet ne mažiau nei $0,75 \text{ kN/m}^2$ ir ne daugiau nei $1,5 \text{ kN/m}^2$. Priimama apkrova yra $0,75 \text{ kN/m}^2$;
- sandėliavimo apkrovos, jeigu yra numatytos;
- užtvenkimo efektas, kai padidėja betono kiekis dėl pakloto įlinkio.

Kai paklotas nuo savo ir šlapio betono įlinksta mažiau nei $1/10$, tai užtvenkimo efekto galima nevertinti, tačiau kai pasiekiami šie ribiniai reikšmės, priimama, kad betono kiekis padidėjo per $0,7 \delta$ per visą tarpatramio ilgį.

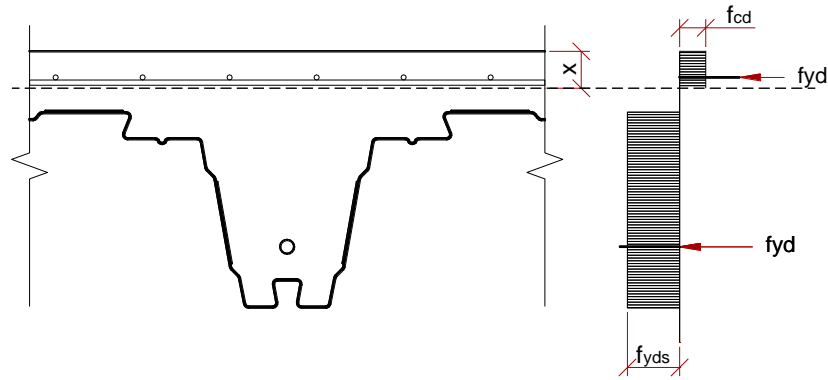
Apkrovos kompozitinei plokštei antroje stadijoje

- apkrovos ir apkrovų deriniai priimti pagal EN 1991-1-1 lentelę 6.2 C kategorijos apkrovoms [2];
- užsidedama 2 kN/m^2 apdailai, komunikacijoms ir pertvaroms.

1.1 Kompozitinės plokštės su profiliuotu paklotu skaičiavimas

Kompozitinė plokštė skaičiuojama kaip paprastai atremta dviatramė sija.

Bendri duomenys



1.1 pav. Kompozitinės plokštės skaičiuojamoji schema

Betonas:

$$C30/37; f_{ck} = 30 \text{ MPa}; f_{cd} = 0,85 \cdot \frac{30}{1,5} = 17 \text{ MPa}; f_{ctk} = 2,0 \text{ MPa}; E_{cm} = 32800 \text{ MPa};$$

Armatūra:

$$f_y = 500 \text{ MPa}; \gamma_s = 1,15; f_{yd} = \frac{500}{1,15} = 434,8 \text{ MPa}; E_s = 210000 \text{ MPa};$$

$$A_{s1} = 1\emptyset 16 = 201 \text{ mm}^2; a_{s1} = 70 \text{ mm};$$

$$A_{s2} = 5\emptyset 6 = 141 \text{ mm}^2; a_{s2} = 30 \text{ mm}$$

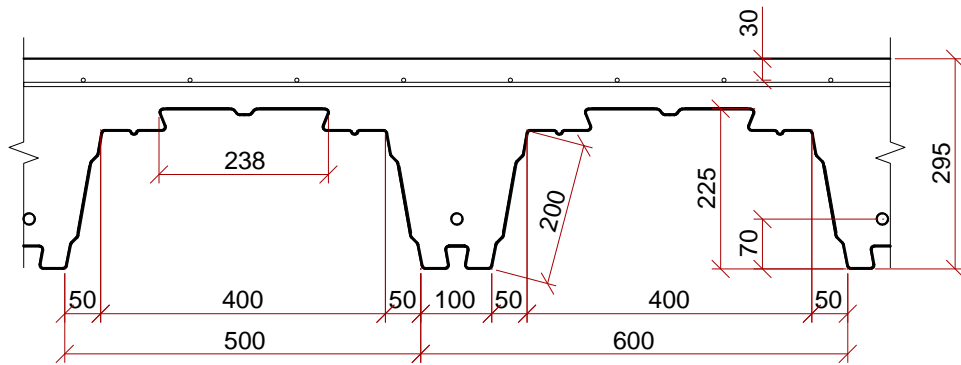
čia A_{s2} – armatūros tinklas 200x200 mm.

Armatūra $\emptyset 16$ parinkta siekiant tenkinti atsparumą ugniai, parinkus mažesnio skersmens armatūrą – konstrukcija netenkina atsparumo ugniai sąlygų [8].

Profiliuotas paklotas „Comflor225“:

Plieno takumo riba	$f_{yds} = 350 \text{ MPa};$
Storis	$t = 1,25 \text{ mm};$
Skaičiuojamasis storis	$t_d = 1,21 \text{ mm};$
Skerspjūvio plotas	$A_p = 2108 \text{ mm}^2/\text{m};$
Inercijos momentas	$I_s = 1,09 \cdot 10^7 \text{ mm}^4;$
Plastinis momento atsparumas	$M_p = 31,66 \text{ kNm};$
Statmenos sienutės atsparumas suspaudimui	$P_w = 39,46 \text{ kN};$
Atstumas iki centro	$e = 134,5 \text{ mm};$
Tamprumo modulis	$E_s = 210000 \text{ MPa}.$

$$n = \frac{E_s}{E_{cm}} = \frac{210000}{32800} = 6,4.$$



1.2 pav. Kompozitinės perdangos su profiliuotu paklotu „Comflor 225“ skerspjūvis

$L=5500$ mm;

$H=295$ mm;

$B=1000$ mm;

$h_p=225$ mm;

$h_c=70$ mm;

$s_d=200$ mm;

$b_0=200$ mm;

$b_s=600$ mm;

Apkrovos:

1.1 lentelė. Apkrovos

Stadija		Apkrovos pavadinimas	
I stadija	Nuolatinė apkrova G_1 , kN/m ²	Plieno paklotas	0,17
		Šlapias betonas (26kN/m ³)	3,51
		$\Sigma G_1=$	3,68
	Kintama apkrova Q_1 , kN/m ²	Montavimo	0,75
		Darbo aikštelė 3x3 m	0,75
		$\Sigma Q_1=$	1,50
		$g_1=$	4,43
II stadija	Nuolatinė apkrova G_2 , kN/m ²	Betonas (25kN/m ³)	3,38
		Plieno paklotas	0,17
		Apdaila, komunikacija, pertvaros	2
		$\Sigma G_2=$	5,55
	Kintama apkrova Q_2 , kN/m ²	Naudojimo	3
		$\Sigma Q_2=$	3
		$g_2=$	8,55

Skaičiuotinės apkrovos:

$$q_1 = 1,35 \cdot (0,17 + 3,51) + 1,5 \cdot 0,75 = 6,09 \text{ kN/m}^2;$$

$$q_2 = 1,35 \cdot (0,17 + 3,38 + 2,0) + 1,5 \cdot 3,0 = 11,99 \text{ kN/m}^2;$$

$$q_{da} = 1,5 \cdot 0,75 = 1,125 \text{ kN/m}^2;$$

čia q_1 – skaičiuotinės apkrovos pirmoje stadijoje;

q_2 – skaičiuotinės apkrovos antroje stadijoje;

g_1 – charakteristinės apkrovos pirmoje stadijoje;

g_2 – charakteristinės apkrovos antroje stadijoje;

q_{da} – skaičiuotinės darbo aikštelės apkrovos.

1.2 Pirma stadija

Pirmoje stadijoje profiliuotas paklotas dirba kaip liktinis klojinys betonui. Apskaičiuoti tokie apkrovų poveikiai:

$$M_{Ed} = \frac{q_1 \cdot L^2}{8} + \frac{q_{da} \cdot 3000 \cdot (2 \cdot L - 3000)}{8}; \quad (1.1)$$

$$M_{Ed} = \frac{6,09 \cdot 5500^2}{8} + \frac{1,125 \cdot 3000 \cdot (2 \cdot 5500 - 3000)}{8} = 26,41 \text{ kNm};$$

$$V_{Ed} = \frac{q_1 \cdot L}{2} + \frac{q_{da} \cdot 3000}{L} \cdot \left(L - \frac{3000}{2} \right); \quad (1.2)$$

$$V_{Ed} = \frac{6,09 \cdot 5500}{2} + \frac{1,125 \cdot 3000}{5500} \cdot \left(5500 - \frac{3000}{2} \right) = 19,21 \text{ kN}.$$

1.2.1 Atsparumas lenkimui

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} = \frac{26,41}{31,66} = 0,83 < 1, \quad \text{Sąlyga tenkinama.} \quad (1.3)$$

čia $M_{Rd} = M_p$ – profiliuoto pakloto tiekėjo pateikta atsparumo lenkimui reikšmė.

1.2.2 Atsparumas vertikaliam kirpimui

Atsparumas kirpimui skaičiuojamas remiantis EN1993-1-3 6.1.5 [4]. Apskaičiuojamas vienos sienutės kirpimo atsparumas.

$$V_{Rd} = \frac{h_p}{\sin\theta} \cdot t_d \cdot f_{bv} = \frac{225}{\sin 79,0} \cdot 1,21 \cdot 108,5 = 30,11 \text{ kN/m}; \quad (1.4)$$

čia h_p – profiliuoto pakloto vertikalios sienutės aukštis;

$\theta = 79^\circ$ – sienutės pasvirimo kampas;

f_{bv} – stiprumas kirpimui įvertinant sienutės išklupimą

$$f_{bv} = 0,31 \cdot f_{yds} = 0,31 \cdot 350 = 108,5 \text{ MPa}; \quad (1.5)$$

Reikšmė 0,31 imama įvertinus sienutės klupumą dėl dviejų standumo bangelių.

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} = \frac{19,21}{30,11} = 0,64 < 1, \quad \text{Sąlyga tenkinama.} \quad (1.6)$$

Statmenos sienutės atsparumas suspaudimui:

$$\frac{V_{Ed}}{P_w} = \frac{19,21}{39,46} = 0,49 < 1, \quad \text{Sąlyga tenkinama.} \quad (1.7)$$

čia $P_w = 39,46 \text{ kN}$ – statmenos sienutės atsparumo suspaudimui vertė, gauta iš profiliuoto pakloto gamintojo atliktų tyrimų.

1.2.3 Įlinkis

Pirmoje stadijoje, kai betonas dar nėra sukietėjęs įlinkis skaičiuojamas remiantis EN 1994-1-1 [1] skyriaus 9.6 nurodymais. Profiliuoto pakloto įlinkis δ_1 , skaičiuojamas nuo savojo svorio plus šlapio betono svoris, nevertinant montavimo apkrovų, neturi viršyti $\delta_{max} = \frac{L}{180}$ reikšmės.

$$\delta_1 = \frac{5}{384} \cdot \frac{G_1 \cdot L^4}{E_s I_s} = \frac{5}{384} \cdot \frac{3,68 \cdot 5500^4}{210000 \cdot 1,09 \cdot 10^7} = 19,2 \text{ mm}; \quad (1.8)$$

$$\delta_{max} = \frac{L}{180} = \frac{5500}{180} = 30,56 \text{ mm}; \quad (1.9)$$

δ_{max} – didžiausias leistinas įlinkis, bet ne daugiau nei 20 mm.

$$\frac{\delta_1}{\delta_{max}} = \frac{19,2}{20} = 0,96, \quad \text{Sąlyga tenkinama.} \quad (1.10)$$

Tikrinama ar dėl įlinkio neatsiranda užpylimo efektas:

$$\delta_1 < H \cdot 10\% \quad (1.11)$$

$$19,2 < 295 \cdot 0,01 = 29,5, \quad \text{Sąlyga tenkinama.}$$

1.3 Antra stadija

Konstrukcija dirba kaip kompozitas, sukietėjęs betonas perima gniuždymo jėgas, o profiliuotas paklotas dirba kaip tempiama armatūra. Apkrovų poveikiai:

$$M_{Ed} = \frac{q_2 \cdot L^2}{8} = \frac{11,99 \cdot 5500^2}{8} = 45,32 \text{ kNm}; \quad (1.12)$$

$$V_{Ed} = \frac{q_2 \cdot L}{2} = \frac{11,99 \cdot 5500}{2} = 32,96 \text{ kNm}; \quad (1.13)$$

1.3.1 Atsparumas lenkimui

Skaičiavimai atliekami remiantis EN1994-1-1 skyriumi 9.7.2. [1].

$$x = \frac{f_{yds} \cdot A_p + f_{yd} \cdot A_{s1} - f_{yd} \cdot A_{s2}}{f_{cd} \cdot B} = \frac{350 \cdot 2108 + 435 \cdot 201 - 435 \cdot 141}{17 \cdot 1000} \quad (1.14)$$

$$= 44,9 \text{ mm};$$

čia A_s – į bangas įdėtas armavimas $1\emptyset 16=201 \text{ mm}^2$.

$$M_{Rd} = f_{cd} \cdot B \cdot \frac{x}{2} + f_{yds} \cdot A_p \cdot (H - e - x) + f_{yd} \cdot A_{s1} \cdot (H - a_{s1} - x) + f_{yd} \cdot A_{s2} \cdot (x - a_{s2}); \quad (1.15)$$

$$M_{Rd} = 17 \cdot 1000 \cdot \frac{44,9}{2} + 350 \cdot 2108 \cdot (295 - 134,5 - 44,9) + 435 \cdot 201 \cdot (295 - 70 - 44,9) + 435 \cdot 141 \cdot (44,9 - 30) = 101,96 \text{ kNm};$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} = \frac{45,32}{101,96} = 0,44 < 1, \quad \text{Sąlyga tenkinama.} \quad (1.16)$$

1.3.2 Vertikalus kirpimas

Remiantis EN 1994-1-1, vertikalus kirpimas $V_{V,Rd}$ turi būti apskaičiuotas kaip nurodyta EN 1992-1-1 6.2.2. metoduose.

Minimali reikšmė $V_{Rd,c}$:

$$V_{Rd,c,min} = (v_{min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) b_w \cdot d_p = (0,542 + 0,15 \cdot 0) 166,67 \cdot 160,5 \quad (1.17)$$

$$= 20,33 \text{ kN};$$

$$V_{V,Rd,c,min} = V_{Rd,c,min} + P_w = 20,33 + 39,46 = 59,79 \text{ kN}; \quad (1.18)$$

$$v_{min} = 0,035 \cdot k^{\frac{2}{3}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}} = 0,035 \cdot 2^{\frac{2}{3}} \cdot 30^{\frac{1}{2}} = 0,542; \quad (1.19)$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d_p}} = 1 + \sqrt{\frac{200}{160,5}} = 2,12 \text{ priimam } k = 2; \quad (1.20)$$

čia $k_1 = 0,15$;

$d_p = H - e = 295 - 134,5 = 160,5 \text{ mm}$;

$\sigma_{cp} = 0$, kadangi konstrukcijos neveikia ašinės jėgos;

b_w – sienutės skerspjūvio plotis neutralioje plokštumoje $b_w = 166,67 \text{ mm}$.

Kirpimo atsparumas $V_{Rd,c}$ skaičiuojamas pagal formulę:

$$V_{Rd,c} = \left(C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right) b_w \cdot d_p \geq V_{l,Rd,min}; \quad (1.21)$$

$$V_{Rd,c} = \left(0,12 \cdot 2 \cdot (100 \cdot 0,02 \cdot 30)^{\frac{1}{3}} + 0,15 \cdot 0 \right) 166,67 \cdot 160,5 = 25,13 \text{ kN};$$

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} = \frac{0,18}{1,5} = 0,12; \quad (1.22)$$

čia $\gamma_c = 1,5$ – betono darbo sąlygų koeficientas.

$$\rho_1 = \frac{A_p}{b_w \cdot d_p} = \frac{2108}{166,67 \cdot 160,5} = 0,056 > 0,02; \quad (1.23)$$

primam $\rho_1 = 0,02$.

Galutinė atsparumo vertikaliam kirpimui reikšmė gaunama pridėjus profiliuoto pakloto statmenos sienutės atsparumą suspaudimui:

$$V_{V,Rd,c} = V_{Rd,c} + P_w = 25,13 + 39,46 = 64,59 \text{ kN}; \quad (1.24)$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{V,Rd,c}} = \frac{32,96}{64,59} = 0,51 < 1, \quad \text{Sąlyga tenkinama.} \quad (1.25)$$

1.3.3 Horizontalus kirpimas

Profiluotas paklotas turi mechaninį sukibimą ir trintį užtikrinančius išsikišimus, todėl skaičiavimai atliekami pagal EN 1994-1-1 skyrių 9.7.3 [1]. Skaičiavimai atliekami m-k metodu:

$$V_{l,Rd} = \frac{B \cdot d}{\gamma_{vs}} \left(\frac{m \cdot A_p}{B \cdot L_s} + k \right) = \frac{1000 \cdot 190}{1,25} \left(\frac{214,8 \cdot 1353,2}{1000 \cdot 1375} + 0,03 \right) = 36,69 \text{ kN/m}; \quad (1.26)$$

čia $m = 214,8$ ir $k = 0,03$ Profiliuoto pakloto gamintojo pateiktos tyrimais paremtos reikšmės;

d – darbinio aukščio atstojamoji $d = 190 \text{ mm}$;

$\gamma_{vs} = 1,25$ – atsargos koeficientas šlyčiai;

A_p – efektyvus profilio pakloto skerspjūvio plotas $A_p = 1353,2 \text{ mm}^2/\text{m}$;

$$L_s = \frac{L}{4} = \frac{5500}{4} = 1375 \text{ mm}; \quad (1.27)$$

Remiantis EN 1994-1-1 skyriumi 9.7.3 punktu (4) [1], horizontalus kirpimas turi tenkinti sąlyga:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{l,Rd}} = \frac{32,96}{36,69} = 0,90 < 1, \quad \text{Sąlyga tenkinama.} \quad (1.28)$$

1.3.4 Įlinkis

Remiantis EN 1992-1-1 skyriaus 7.4.1, punkto 4 nurodymais įlinkis δ_2 neturi viršyti $\delta_{max} = \frac{L}{250}$ reikšmės [6].

Nesupleišėjusio skerspjūvio neutralios ašies padėtis nuo viršutinio paviršiaus:

$$y_{uncr} = \frac{\sum A_i \cdot y_i}{\sum A_i} \quad (1.29)$$

$$= \frac{0,5 \cdot B \cdot h_c^2 + b_m \cdot h_p \left(H - \frac{h_p}{2} \right) + A_p \cdot n \cdot d_p + A_{s1} \cdot n(H - a_{s1}) + A_{s2} \cdot n \cdot a_{s2}}{h_c \cdot B + b_m \cdot h_p + n \cdot (A_p + A_{s1} + A_{s2})};$$

y_{uncr}

$$= \frac{0,5 \cdot 1000 \cdot 70 + 216,7 \cdot 225 \left(295 - \frac{225}{2} \right) + 2108 \cdot 6,4 \cdot 160,5 + 201 \cdot 6,4 \cdot (295 - 70) + 141 \cdot 6,4 \cdot 30}{70 \cdot 1000 + 216,7 \cdot 225 + 6,4 \cdot (2108 + 201 + 141)}$$

$$= 102,9 \text{ mm};$$

čia $b_m = 216,7 \text{ mm/m}$ – užbetonuotos dalies tarp sienelių vidutinis plotis.

Nesupleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį skaičiuojamas pagal formulę:

$$I_{uncr} = \frac{B \cdot h_c^3}{12 \cdot n} + \frac{B \cdot h_c}{n} \cdot \left(y_{uncr} - \frac{h_c}{2} \right)^2 + \frac{b_m \cdot h_p^3}{12 \cdot n} + \frac{b_m \cdot h_p}{n} \cdot \left(H - \frac{h_p}{2} - y_{uncr} \right)^2 + \quad (1.30)$$

$$I_s + A_p \cdot (d_p - y_{uncr})^2 + A_{s1} \cdot (H - a_{s1} - y_{uncr})^2 + A_{s2} \cdot (a_{s2} - y_{uncr})^2;$$

$$I_{uncr} = \frac{1000 \cdot 70^3}{12 \cdot 6,4} + \frac{1000 \cdot 70}{6,4} \cdot \left(102,9 - \frac{70}{2} \right)^2 + \frac{216,7 \cdot 225^3}{12 \cdot 6,4} + \frac{216,7 \cdot 225}{6,4} \cdot \left(295 - \frac{225}{2} - 102,9 \right)^2 + 1,09 \cdot 10^7 + 2108 \cdot (160,5 - 102,9)^2 + 201 \cdot (295 - 70 - 102,9)^2 + 141 \cdot (30 - 102,9)^2 = 1,57 \cdot 10^8 \text{ mm}^4;$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutralios ašies padėtis nuo viršutinio paviršiaus y_{cr} apskaičiuojama iš lygties:

$$\Sigma A_i \cdot y_i - \Sigma A_i \cdot y_{cr} = 0;$$

$$B \cdot 0,5y_{cr}^2 + A_p \cdot n \cdot d_p + A_{s1} \cdot n(H - a_{s1}) + A_{s2} \cdot n \cdot a_{s2} - (B \cdot y_{cr} + n(A_p + A_{s2} + A_{s1}))y_{cr} = 0; \quad (1.31)$$

$$1000 \cdot 0,5y_{cr}^2 + 2108 \cdot 6,4 \cdot 160,5 + 201 \cdot 6,4(295 - 70) + 141 \cdot 6,4 \cdot 30 - (1000 \cdot y_{cr} + 6,4(2108 + 201 + 141))y_{cr} = 0;$$

$$y_{cr} = 56,5 \text{ mm};$$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį skaičiuojamas pagal formulę:

$$I_{cr} = \frac{B \cdot y_{cr}^3}{3 \cdot n} + B \cdot 0,5y_{cr}^2 + I_s + A_p \cdot (d_p - y_{cr})^2 + A_{s1} \cdot (H - a_{s1} - y_{cr})^2 + A_{s2} \cdot (a_{s2} - y_{cr})^2; \quad (1.32)$$

$$I_{cr} = \frac{1000 \cdot 56,5^3}{3 \cdot 6,4} + 1000 \cdot 0,5 \cdot 56,5^2 + 1,09 \cdot 10^7 + 2108 \cdot (160,5 - 56,5)^2 + 201 \cdot (295 - 70 - 56,5)^2 + 141 \cdot (30 - 56,5)^2 = 5,05 \cdot 10^7 \text{ mm}^4;$$

$$I_{vid} = \frac{I_{uncr} + I_{cr}}{2} = \frac{1,57 \cdot 10^8 + 5,05 \cdot 10^7}{2} = 1,04 \cdot 10^8 \text{ mm}^4; \quad (1.33)$$

čia: y_{uncr} , y_{cr} ir I_{uncr} , I_{cr} atitinkamai nesupleišėjusio ir supleišėjusio skerspjūvio neutralios ašies padėtis nuo viršutinio paviršiaus ir inercijos momentai apie neutralią ašį.

Perdangos įlinkis antroje stadijoje:

$$\delta_2 = \frac{5}{384} \cdot \frac{g_2 \cdot L^4}{E_s I_{vid}} = \frac{5}{384} \cdot \frac{8,55 \cdot 5500^4}{210000 \cdot 1,04 \cdot 10^8} = 4,67 \text{ mm}; \quad (1.34)$$

$$\delta_{max} = \frac{L}{250} = 22 \text{ mm}; \quad (1.35)$$

$$\frac{\delta_2}{\delta_{max}} = \frac{4,7}{22} = 0,21, \quad \text{Sąlyga tenkinama.} \quad (1.36)$$

Įlinkis tik nuo uždėtų apkrovų atsirandančių antroje stadijoje, be savo svorio:

$$\delta_{2l} = \frac{5}{384} \cdot \frac{(g_i + q_i) \cdot L^4}{E_s I_{vid}} = \frac{5}{384} \cdot \frac{(2 + 3) \cdot 5500^4}{210000 \cdot 1,04 \cdot 10^8} = 2,7 \text{ mm}; \quad (1.37)$$

Suminis įlinkis:

$$\delta_{\Sigma} = \delta_1 + \delta_{2l} = 21,9 \text{ mm}; \quad (1.38)$$

$$\delta_{max} = \frac{L}{250} = 22 \text{ mm}; \quad (1.39)$$

$$\frac{\delta_{\Sigma}}{\delta_{max}} = \frac{21,9}{22} = 0,995, \quad \text{Sąlyga tenkinama.} \quad (1.40)$$

1.3.5 Pleišėjimas

Pagal EN 1994-1-1 skyrių 9.8.1 (2) [1] viršutinis armavimas turi būti ne mažiau nei 0,2% nuo betono skerspjūvio virš profiliuoto pakloto. Perdangose, kurias montuojant naudojami paramstymai–reikalinga ne mažiau nei 0,4%.

$$A_{s2} = 0,002 \cdot B \cdot h_c = 0,002 \cdot 1000 \cdot 70 = 140 \text{ mm}^2; \quad (1.41)$$

Pasirenkame 5Ø6 $A_{s2} = 141 \text{ mm}^2$.

Atsparumas pleišėjimui

Remiantis STR2-05-05-2005 5 priedą [8] lenkiamųjų gelžbetoninių elementų normalinių plyšių atsiradimas tikrinimas pagal sąlygą: $M_r \leq M_{cr}$,

čia $M_r = M_{Ed}$ – skaičiuojamas nuo charakteristinių apkrovų derinio.

Apskaičiuojamas atstumas nuo masės centro iki labiausiai tempiamos zonos:

$$y_t = H - y_{uncr} = 295 - 102,9 = 192,1 \text{ mm}. \quad (1.42)$$

Plastinis atsparumo momentas:

Nesupleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį skaičiuojamas pagal formulę:

$$I_{eff} = \frac{B \cdot h_c^3}{12} + B \cdot h_c \cdot \left(y_{uncr} - \frac{h_c}{2}\right)^2 + \frac{b_m \cdot h_p^3}{12} + b_m \cdot h_p \cdot \left(H - \frac{h_p}{2} - y_{uncr}\right)^2 + I_s \cdot n + A_p \cdot n \cdot (d_p - y_{uncr})^2 + A_{s1} \cdot n \cdot (H - a_{s1} - y_{uncr})^2 + A_{s21} \cdot n \cdot (a_{s2} - y_{uncr})^2; \quad (1.43)$$

$$I_{eff} = \frac{1000 \cdot 70^3}{12} + 1000 \cdot 70 \cdot \left(102,9 - \frac{70}{2}\right)^2 + \frac{216,7 \cdot 225^3}{12} + 216,7 \cdot 225 \cdot \left(295 - \frac{225}{2} - 102,9\right)^2 + 1,09 \cdot 10^7 \cdot 6,4 + 2108 \cdot 6,4 \cdot (160,5 - 102,9)^2 + 201 \cdot 6,4 \cdot (295 - 70 - 102,9)^2 + 141 \cdot 6,4 \cdot (30 - 102,9)^2 = 1,0 \cdot 10^9 \text{ mm}^4;$$

$$W_{eff} = \frac{I_{eff}}{y_t} = \frac{1,0 \cdot 10^9}{192,1} = 5,23 \cdot 10^6 \text{ mm}^4; \quad (1.44)$$

$$M_{crc} = f_{ctk} \cdot W_{eff} = 2,0 \cdot 5,23 \cdot 10^6 = 10,60 \text{ kN}; \quad (1.45)$$

$$\frac{M_{g2}}{M_{crc}} = \frac{32,31}{10,60} = 3,06, \quad \text{Sąlyga netenkinama.} \quad (1.46)$$

Atsiveria plyšiai.

čia M_{g1} skaičiuojamas nuo charakteristinės apkrovų:

$$M_{g2} = \frac{g_2 L^2}{8} = \frac{8,55 \cdot 5500^2}{8} = 32,31 \text{ kNm}. \quad (1.47)$$

Tikrasis skerspjūvio pleišėjimas nėra žinomas ir plyšio plotis nėra skaičiuojamas, kadangi profiliuotas paklotas dengia betono paviršių.

1.3.6 Rezultatai

Konstrukcijos aukštis $H=295$ mm, o savasis svoris 347 kg/m^2 .

1.2 lentelė. Pirmos konstrukcijos mechaninės savybės

1 stadija			2 stadija					
M_{Rd} , kNm	V_{Rd} , kN	δ_1 , mm	M_{Rd} , kNm	V_{Rd} , kN	δ_2 , mm	$V_{l,Rd}$, kN/m	M_{crc} , kNm	$\Sigma \delta$ mm
31,66	30,11	19,2	104,53	64,59	47	36,69	10,60	21,9
83%	64%	96%	43%	51%	21%	90%	305%	99,5%

1.3 lentelė. Pirmos konstrukcijos medžiagų kiekiai ir jų kainos

Medžiaga	Betonas	Plienas	Armatūra	Σ
Kiekis, kg/m^2	324	17	5,6	347
Kaina, eur/m^2	10,88	20,4	5,39	36,67

Kompozitinių profiliuoto pakloto perdangos projektavimo programos „Comflor 9“ skaičiavimo ataskaita pateikta 1 priede. Rezultatai gauti skaičiuojant „Comflor 9“ programa yra tokie:

1.4 lentelė. Pirmos konstrukcijos mechaninės savybės apskaičiuotos „ComFlor 9“ programa

	1 stadija			2 stadija			
	M_{Rd} , kNm	V_{Rd} , kN	δ_1 , mm	M_{Rd} , kNm	V_{Rd} , kN	δ_2 , mm	$V_{l,Rd}$, kN/m
Skaičiavimai "ComFlor 9"	31,66 88%	30,27 67%	18,72 94%	99,04 44%	64,60 49%	4,78 21%	36,46 61%

1.5 lentelė. skaičiavimų programa „Comflor 9“ ir skaičiavimų ranka palyginimas

	1 stadija			2 stadija			
	M_{Rd} , kNm	V_{Rd} , kN	δ_1 , mm	M_{Rd} , kNm	V_{Rd} , kN	δ_2 , mm	$V_{l,Rd}$, kN/m
Skaičiavimai "ComFlor 9"	31,66 88%	30,27 67%	18,72 94%	99,04 44%	64,60 49%	4,78 21%	36,46 61%
Skaičiavimai ranka	31,66 83%	30,11 64%	19,16 96%	104,53 43%	64,59 51%	4,67 21%	36,69 90%
Skirtumas	0,00	0,16	-0,44	-5,49	0,01	0,11	-0,23

Skaičiavimų rezultatai yra panašūs, skiriasi tik M_{Rd} dėl tikslaus skerspjūvio plotų apskaičiavimo. „Comflor 9“ tiksliai įvertina profiliuoto pakloto bangų vidinius ir išorinius matmenis.

2. KOMPOZITINĖS PERDANGOS SU ĮBETONUOTA PLIENINE SIJA

Įbetonuota plieninė sija perdangai suteikia stiprumo ir ilgaamžiškumo, plienas yra apsaugotas nuo ugnies poveikio taip yra užtikrinamas didelis atsparumas ugniai. Perdangos su įbetonuota plienine sija įlinkis yra mažesnis ir didesnis standumas [17].

Kompozitinė perdanga susideda iš tokių elementų:

- surenkamas liktinis klojinys;
- plieninė dvitėjinio profilio sija;
- monolitas;
- armavimas.

Liktinis klojinys atlieka keletą funkcijų:

- atlaiko apkrovas statybos metu;
- veikia kaip darbo platforma;
- kompozitinėje stadijoje dirba kartu su monolitiniu sluoksniu.

Projektuojant kompozitinę perdangą su liktiniais klojiniais reikia atsižvelgti į užtvėnkimo efektą, kai pilant betoną liktinis klojinys įlinksta daugiau nei 10% ir įlinkio vietoje susitelkia daugiau betono.

Armavimas

Armavimas kompozitinėje plokštėje yra reikalingas, net jeigu plieninė sija galėtų atlaikyti visas apkrovas. Esant koncentruotoms arba linijinėms jėgoms reikalingas armatūros tinklas, tam, kad paskirstyti jėgas. Papildomas armavimas reikalingas prie angų, atramų, kur momentas yra neigiamas, susitraukimo įtempių paskirstymui. Keičiant išilginės armatūros skersmenis galima suvaldyti nepageidaujamus įlinkius ir įtempių pasiskirstymus.

Plieno įbetonavimo sąlygos:

Kadangi ši perdanga turi pilnai įbetonuotas plienines sijas tai priimama, kad mechaninės šlyties jungtys tarp plieno ir betono nėra reikalingos EN1994-2 6.3.2 [7], norint užtikrinti pilną kompozitinę sveiką tarp plieno ir betono, minimalus betono apsauginis sluoksnis priimamas 40mm. Surenkama gelžbetoninė plokštė skaičiuojama kaip dviatramė sija, yra išskiriamos dvi darbo stadijos: pirma stadija, kai užpiltas šlapias betonas dar nesukietėjo ir antra stadija, kai viršutinė dalis pasiekia savo projektinį stiprį.

Apkrovos, kurias reikia įvertinti skaičiuojant klojinį betonui:

- betono svoris ant klojinio 24 kN/m^3 plus 1 kN/m^3 armavimas ir 1 kN/m^3 kai betonas šlapias pagal EN 1991-1-1, A.1 lentelę[2];
- montavimo apkrovos $1,5 \text{ kN/m}^2$;

- kai klojinys nuo savo ir šlapio betono įlinksta 10% nuo užpilamo betono sluoksnio storio, tai reikia įvertinti užtvėnkimo efektą, priimant, kad betono kiekis padidėjo per 0,7 δ per visą tarpartramio ilgį.
- apkrovos ir apkrovų deriniai priimami pagal EN 1991-1-1 [2] ir EN 1990 [12].

Betonas:

$$C30/37; f_{cd} = 0,9 \cdot \frac{30}{1,5} = 18 \text{ MPa}; f_{ctm} = 2,9 \text{ MPa}; f_{ctk} = 2.0 \text{ MPa}; E_{cm} = 32800 \text{ MPa};$$

Armatūra:

$$f_y=500 \text{ MPa}; \gamma_s=1,15; f_{yd} = \frac{500}{1,15} = 435 \text{ MPa}; E_s=210000 \text{ MPa};$$

Plienas IPE 100:

$$f_y=355 \text{ MPa}; \gamma_s=1,0; f_{yds} = \frac{355}{1,0} = 355 \text{ MPa}; E_s=210000 \text{ MPa};$$

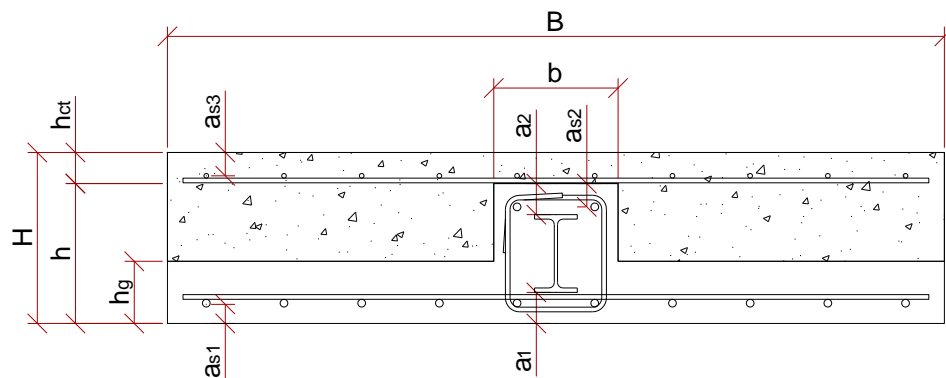
$$A_s=1030 \text{ mm}^2; m=8,1 \text{ kg/m}; rad=7;$$

$$W_{pl}=3,94 \cdot 10^4 \text{ mm}^4; I_s=1,71 \cdot 10^6 \text{ mm}^4; S=20000 \text{ mm}^3;$$

$$b_f = 55 \text{ mm}; t_f = 5,7 \text{ mm}; h_w = 100 \text{ mm}; t_w = 4,1 \text{ mm};$$

$$n = \frac{E_s}{E_{cm}} = \frac{210000}{32800} = 6,4.$$

Skaičiuojamos konstrukcijos skerspjūvio matmenys:



2.1 pav. Skaičiuojamos konstrukcijos skerspjūvis

$$L=5500 \text{ mm};$$

$$a_1=40 \text{ mm};$$

$$B=1000 \text{ mm};$$

$$a_2=40 \text{ mm};$$

$$H=220 \text{ mm};$$

$$a_{s1}=25 \text{ mm};$$

$$b=160 \text{ mm};$$

$$a_{s2}=30 \text{ mm};$$

$$h=180 \text{ mm};$$

$$a_{s3}=30 \text{ mm};$$

$$h_g=80 \text{ mm};$$

$$h_{ct}=40 \text{ mm};$$

Apkrovos:

2.1 Apkrovų lentelė

Stadija	Apkrovos pavadinimas	Nuolatinė apkrova, kN/m ²
I stadija	Klojinys (25 kN/m ³)	2,4
	Plienas	0,08
	Šlapias betonas (26 kN/m ³)	3,22
	Užtvėnkimo efektas	0,00
	$\Sigma G_1=$	5,71
		Kintama apkrova, kN/m ²
	Montavimo	1,5
Stadija	Konstrukcija	Nuolatinė apkrova, kN/m ²
II stadija	Klojinys (25 kN/m ³)	2,4
	Plienas	0,08
	Sukietėjęs betonas (25 kN/m ³)	3,1
	Užtvėnkimo efektas	0,0
	Apdaila, komunikacija, pertvaros	2,0
	$\Sigma G_2=$	7,58
		Kintama apkrova, kN/m ²
	Naudojimo	3,0

Skaičiuotinės apkrovos:

$$q_1 = 1,35 \cdot 5,71 + 1,5 \cdot 1,5 = 9,95 \text{ kN/m}^2;$$

$$q_2 = 1,35 \cdot 7,58 + 1,5 \cdot 3,0 = 14,73 \text{ kN/m}^2;$$

Charakteristinės apkrovos:

$$g_1 = 5,71 + 1,5 = 7,21 \text{ kN/m}^2;$$

$$g_2 = 7,58 + 3,0 = 10,58 \text{ kN/m}^2;$$

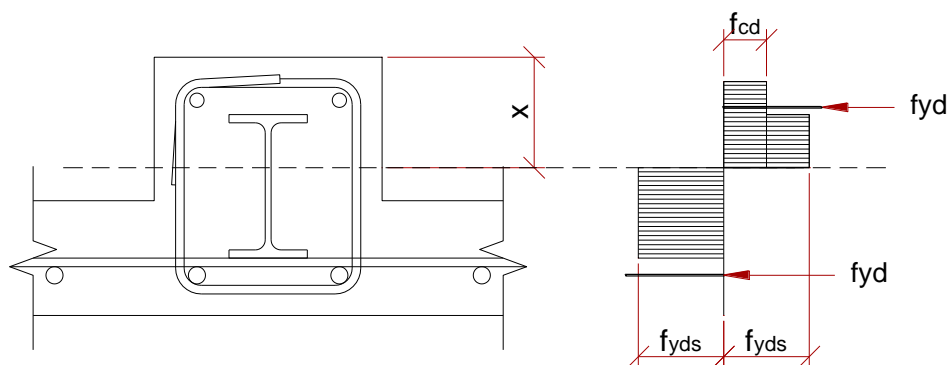
2.1 Pirma stadija

Monolitinis sluoksnis šioje stadijoje nedirba, jis yra apkrova, o visas apkrovas atlaiko liktinis klojinys.

$$M_{Ed} = \frac{q_1 \cdot L^2}{8} = \frac{9,95 \cdot 5500^2}{8} = 37,63 \text{ kNm}; \quad (2.1)$$

$$V_{Ed} = \frac{q_1 \cdot L}{2} = \frac{9,95 \cdot 5500}{2} = 27,37 \text{ kN}; \quad (2.2)$$

2.1.1 Atsparumas lenkimui



2.2 pav. Pirmos stadijos skaičiuotinė schema

Neutrali ašis apskaičiuojama iš jėgų pusiausvyros x ašyje – tempimo jėgų suma tempiamoje zonoje turi būti lygi gniuždymo jėgų sumai gniuždomoje zonoje. Tikriname ar x kerta plieno profilį:

$$F_{Cc} + F_{a2} = F_{St} + F_{a1}; \quad (2.3)$$

$$115,2 + 68,3 = 365,65 + 204,89;$$

$$183,50 < 570,54$$

tai reiškia $x > a_2$; kerta plieno profilį.

čia $F_{Cc} = f_{cd} \cdot b \cdot a_2 = 18 \cdot 160 \cdot 40 = 115,2 \text{ kN}$ – gniuždomas betonas virš plieninio profilio;

$$F_{a2} = A_{s2} \cdot f_{yd} = 157 \cdot 435 = 68,30 \text{ kN} \text{ – gniuždoma armatūra};$$

$$F_{St} = A_s \cdot f_{yds} = 1030 \cdot 355 = 365,65 \text{ kN} \text{ – tempiamas plienas};$$

$$F_{a1} = A_{s1} \cdot f_{yd} = 471 \cdot 435 = 204,89 \text{ kN} \text{ – tempiamą armatūrą};$$

$$A_{s1} = 6\emptyset 10 = 471 \text{ mm}^2;$$

$$A_{s2} = 2\emptyset 10 = 157 \text{ mm}^2.$$

Priartėjimo būdu skaičiuojamas x , kol tenkinama ši sąlyga:

$$F_{St} + F_{a1} = F_{Cc} + F_{Sc} + F_{a2}; \quad (2.4)$$

$$204,72 + 204,89 = 194,48 + 146,83 + 68,30;$$

Gauname – $x = 70,1 \text{ mm}$.

$$F_{St} = f_{yds} \cdot (b_f \cdot t_f + t_w \cdot (a_2 + h_w - x - t_f)); \quad (2.5)$$

$$F_{St} = 355 \cdot (55 \cdot 5,7 + 4,1 \cdot (40 + 100 - x - 5,7)) = 204,72 \text{ kN};$$

$$F_{Cc} = f_{cd} \cdot (b \cdot x - b_f \cdot t_f - t_w \cdot (x - a_2 - t_f)); \quad (2.6)$$

$$F_{Cc} = 18 \cdot (160 \cdot x - 55 \cdot 5,7 - 4,1 \cdot (x - 40 - 5,7)) = 194,48 \text{ kN};$$

$$F_{Sc} = f_{yds} \cdot (b_f \cdot t_f + t_w \cdot (x - a_2 - t_f)); \quad (2.7)$$

$$F_{Sc} = 355 \cdot (55 \cdot 5,7 + 4,1 \cdot (x - 40 - 5,7)) = 146,83 \text{ kN};$$

čia: F_{St} - tempiamos plieninės sijos dalies jėga;

F_{Sc} - gniuždomos plieninės sijos dalies jėga;

F_{Cc} - betono gniuždomosios zonos jėga.

$$y_{St} = \frac{t_w \cdot 0,5 \cdot (a_2 + h_w - x - t_f)^2 + b_f \cdot t_f \cdot (a_2 + h_w - x - \frac{t_f}{2})}{(t_w \cdot (a_2 + h_w - x - t_f) + b_f \cdot t_f)}; \quad (2.8)$$

$$y_{St} = \frac{4,1 \cdot 0,5 \cdot (40 + 100 - 70,1 - 5,7)^2 + 55 \cdot 5,7 \cdot (40 + 100 - 70,1 - \frac{5,7}{2})}{(4,1 \cdot (40 + 100 - 70,1 - 5,7) + 55 \cdot 5,7)} = 51,1 \text{ mm};$$

$$y_{Sc} = \frac{t_w \cdot 0,5 \cdot (x - a_2 - t_f)^2 + b_f \cdot t_f \cdot (x - a_2 - \frac{t_f}{2})}{(t_w \cdot (x - a_2 - t_f) + b_f \cdot t_f)}; \quad (2.9)$$

$$y_{Sc} = \frac{4,1 \cdot 0,5 \cdot (70,1 - 40 - 5,7)^2 + 55 \cdot 5,7 \cdot (70,1 - 40 - \frac{5,7}{2})}{(4,1 \cdot (70,1 - 40 - 5,7) + 55 \cdot 5,7)} = 23,6 \text{ mm};$$

$$y_{Cc} = \frac{x}{2} = \frac{70,1}{2} = 35,1 \text{ mm}; \quad (2.10)$$

$$y_{a1} = h - x - a_{s1} = 180 - 70,1 - 25 = 84,9 \text{ mm}; \quad (2.11)$$

$$y_{a2} = x - a_{s2} = 70,1 - 30 = 40,1 \text{ mm}; \quad (2.12)$$

čia: y_{st} - plieninės sijos tempiamosios dalies svorio centro atstumas iki x ;

y_{sc} - plieninės sijos gniuždomosios dalies svorio centro atstumas iki x ;

y_{cc} - betono gniuždomosios zonos masės centro atstumas iki x ;

y_{a1} - tempiamos armatūros atstumas iki x ;

y_{a2} - gniuždomos armatūros atstumas iki x .

Atsparumas lenkimui:

$$M_{Rd} = F_{St} \cdot y_{St} + F_{Cc} \cdot y_{Cc} + F_{Sc} \cdot y_{Sc} + F_{a1} \cdot y_{a1} + F_{a2} \cdot y_{a2};$$

$$M_{Rd} = 204,72 \cdot 51,1 + 194,48 \cdot 35,1 + 146,83 \cdot 23,6 + 204,89 \cdot 84,9 + 68,3 \cdot 40,1 = 40,88 \text{ kNm}; \quad (2.13)$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} = \frac{37,63}{40,88} = 0,92, \quad \text{Sąlyga tenkinama.} \quad (2.14)$$

2.1.2 Atsparumas kirpimui

Remiantis Collings, D. (2010), pilnai įbetonuotos plieninės sijos, vertikalus kirpimas skaičiuojamas priimant sąlygą, kad plieninis skerspjūvis perima visą vertikalią kirpimo jėgą, kadangi betoninio elemento atsparumas kirpimui yra santykinai mažas [17]. Skaičiavimas atliekamas pagal EN 1993-1-1 6.2.6 [5].

$$A_v = A_s - 2 \cdot b_f \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot rad) \cdot t_f \quad (2.15)$$

$$A_v = 1030 - 2 \cdot 55 \cdot 5,7 + (4,1 + 2 \cdot 7) \cdot 5,7 = 506,17 \text{ mm}^2.$$

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_{yds}}{\sqrt{3}} = 506,17 \frac{355}{\sqrt{3}} = 103,74 \text{ kN}; \quad (2.16)$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} = \frac{27,37}{103,74} = 0,26, \quad \text{Sąlyga tenkinama.} \quad (2.17)$$

2.1.3 Įlinkio skaičiavimas

Pirmoje stadijoje, kai betonas dar nėra sukietėjęs įlinkis skaičiuojamas remiantis EN 1994-1-1 [1] skyriaus 9.6 nurodymais. Įlinkis δ_1 , skaičiuojamas nuo savojo svorio plus šlapio betono svoris, nevertinant montavimo apkrovų, neturi viršyti $\delta_{max} = \frac{L}{180}$ reikšmės. Skaičiuojant kompozitinės perdangos įlinkį remiamasi Vayas I., Iliopoulos A. „Design of Steel-Concrete Composite Bridges to Eurocodes“ 10.5.2 skyriaus nurodymais ir inercijos momentas I_{eff} skaičiuojamas imant supleišėjusio ir nesupleišėjusio skerspjūvio inercijos momentų vidurkis.

$$I_{eff} = I_{vid} = \frac{I_{uncr} + I_{cr}}{2}; \quad (2.18)$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio neutralios ašies padėtis nuo viršutinio paviršiaus:

$$y_{uncr} = \frac{\Sigma A_i \cdot y_i}{\Sigma A_i} = \frac{0,5bh^2 + (B-b)h_g \left(h - \frac{h_g}{2}\right) + n \left(A_s \left(\frac{h_w}{2} + a_2\right) + A_{s1}(h - a_{s1}) + A_{s2}a_{s2}\right)}{h \cdot b + (B-b) \cdot h_g + n \cdot (A_s + A_{s1} + A_{s2})}; \quad (2.19)$$

$$y_{uncr} = \frac{0,5 \cdot 160 \cdot 180^2 + (1000 - 160)80 \left(180 - \frac{80}{2}\right) + 6,4 \cdot (1030 \left(\frac{100}{2} + 40\right) + 471(180 - 25) + 157 \cdot 30)}{180 \cdot 160 + (1000 - 160) \cdot 80 + 6,4 \cdot (1030 + 471 + 157)} = 122,8 \text{ mm};$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį:

$$I_{uncr} = \frac{b \cdot h^3}{12} + b \cdot h \cdot \left(y_{uncr} - \frac{h}{2}\right)^2 + \frac{(B-b) \cdot h_g^3}{12} + (B-b) \cdot h_g \cdot \left(h - \frac{h_g}{2} - y_{uncr}\right)^2 + I_s \cdot n + A_s \cdot n \cdot \left(\frac{h_w}{2} + a_2 - y_{uncr}\right)^2 + A_{s1} \cdot n \cdot (h - a_{s1} - y_{uncr})^2 + A_{s2} \cdot n \cdot (y_{uncr} - a_{s2})^2; \quad (2.20)$$

$$I_{uncr} = \frac{160 \cdot 180^3}{12} + 160 \cdot 180 \cdot \left(122,8 - \frac{180}{2}\right)^2 + \frac{(1000 - 160) \cdot 80^3}{12} + (1000 - 160) \cdot 80 \cdot \left(180 - \frac{80}{2} - 122,8\right)^2 + 1,71 \cdot 10^6 \cdot 6,4 + 1030 \cdot 6,4 \cdot \left(\frac{100}{2} + 40 - 122,8\right)^2 + 471 \cdot 6,4 \cdot (180 - 25 - 122,8)^2 + 157 \cdot 6,4 \cdot (122,8 - 30)^2 = 1,94 \cdot 10^8 \text{ mm}^4;$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutralios ašies padėtis nuo viršutinio paviršiaus y_{cr} apskaičiuojama iš lygties:

$$\begin{aligned} \Sigma A_i \cdot y_i - \Sigma A_i \cdot y_{cr} &= 0; \\ 0,5b \cdot y_{cr}^2 + A_s \cdot n \left(\frac{h_w}{2} + a_2\right) + A_{s1} \cdot n(h - a_{s1}) + A_{s2} \cdot n \cdot a_{s2} - (b \cdot y_{cr} + n(A_s + A_{s1} + A_{s2}))y_{cr} &= 0; \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$0,5 \cdot 160 \cdot y_{cr}^2 + 1030 \cdot 6,4 \left(\frac{100}{2} + 40\right) + 471 \cdot 6,4(180 - 25) + 157 \cdot 6,4 \cdot 30 - (160 \cdot y_{cr} + 6,4(1030 + 471 + 157))y_{cr} = 0;$$

$$y_{cr} = 68,0 \text{ mm};$$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį:

$$I_{cr} = \frac{b \cdot y_{cr}^3}{3} + b \cdot y_{cr} \left(\frac{y_{cr}}{2}\right)^2 + I_s \cdot n + A_s \cdot n \left(\frac{h_w}{2} + a_2 - y_{cr}\right)^2 + A_{s1} \cdot n(h - a_{s1} - y_{cr})^2 + A_{s2} \cdot n(y_{cr} - a_{s1})^2; \quad (2.22)$$

$$I_{cr} = \frac{160 \cdot 68,0^3}{3} + 160 \cdot 68,0 \left(\frac{68,0}{2}\right)^2 + 1,71 \cdot 10^6 \cdot 6,4 + 1030 \cdot 6,4 \cdot \left(\frac{100}{2} + 40 - 68,0\right)^2 + 471 \cdot 6,4(180 - 25 - 68,0)^2 + 157 \cdot 6,4(68,0 - 30)^2 = 6,78 \cdot 10^7 \text{ mm}^4; \quad (2.23)$$

$$I_{vid} = \frac{I_{uncr} + I_{cr}}{2} = \frac{1,94 \cdot 10^8 + 6,78 \cdot 10^7}{2} = 1,31 \cdot 10^8 \text{ mm}^4. \quad (2.24)$$

Perdangos įlinkis pirmoje stadijoje dar nesukietėjus viršutiniam betonui sluoksniui:

$$\delta_1 = \frac{5}{384} \cdot \frac{G_1 \cdot L^4}{E_{cm} I_{vid}} = \frac{5}{384} \cdot \frac{5,71 \cdot 5500^4}{32800 \cdot 1,31 \cdot 10^8} = 15,8 \text{ mm}, \quad (2.25)$$

čia: G_1 - nuolatinių apkrovų charakteristinė reikšmė.

$$\delta_{max} = \frac{L}{180} = \frac{5500}{180} = 30,56 > 20 \text{ mm}; \quad (2.26)$$

δ_{max} – didžiausias leistinas įlinkis, bet ne daugiau nei 20 mm.

$$\frac{\delta_1}{\delta_{max}} = \frac{15,8}{20} = 0,79, \quad \text{Sąlyga tenkinama.} \quad (2.27)$$

2.1.4 Atsparumas pleišėjimui

Apskaičiuojamas atstumas nuo masės centro iki labiausiai tempiamo paviršiaus:

$$y_t = h - y_{uncr} = 180 - 122,8 = 57,2 \text{ mm}. \quad (2.28)$$

Nesupleišėjusio skerspjuvio inercijos momentas apie neutralią ašį, nevertinant plieno:

$$I_{eff} = \frac{b \cdot h^3}{12} + b \cdot h \cdot \left(y_{uncr} - \frac{h}{2}\right)^2 + \frac{(B-b) \cdot h_g^3}{12} + (B-b) \cdot h_g \cdot \left(h - \frac{h_g}{2} - y_{uncr}\right)^2 + A_{s1} \cdot n \cdot (h - a_{s1} - y_{uncr})^2 + A_{s2} \cdot n \cdot (y_{uncr} - a_{s2})^2; \quad (2.29)$$

$$I_{eff} = \frac{160 \cdot 180^3}{12} + 160 \cdot 180 \cdot \left(122,8 - \frac{180}{2}\right)^2 + \frac{(1000 - 160) \cdot 80^3}{12} + (1000 - 160) \cdot 80 \cdot \left(180 - \frac{80}{2} - 122,8\right)^2 + 471 \cdot 6,4 \cdot (180 - 25 - 122,8)^2 + 157 \cdot 6,4 \cdot (122,8 - 30)^2 = 1,8 \cdot 10^8 \text{ mm}^4;$$

Plastinis gelžbetoninio elemento atsparumo momentas:

$$W_{pl1} = 1,75 \cdot \frac{I_{eff}}{y_t} = 1,75 \cdot \frac{1,8 \cdot 10^8}{57,2} = 5,39 \cdot 10^6 \text{ mm}^4; \quad (2.30)$$

Plastinis plieninio elemento atsparumo momentas:

$$W_I^{pl} = 1,17 \cdot W_{pl} + \left(\left(\frac{h_w}{2} + a_2 \right) - y_{uncr} \right) \cdot t_w \quad (2.31)$$

$$= 1,17 \cdot 3,94 \cdot 10^4 + \left(\left(\frac{100}{2} + 40 \right) - 122,8 \right) \cdot 4,1 = 5,05 \cdot 10^4 \text{ mm}^4;$$

čia $W_{pl} = 3,94 \cdot 10^4 \text{ mm}$ – plieno atsparumo modulis.

Pleišėjimo momentas:

$$M_{crc} = f_{ctk} \cdot (W_{pl1} + n \cdot W_I^{pl}) = 2,0 \cdot (5,39 \cdot 10^6 + 6,4 \cdot 5,05 \cdot 10^4) = 11,43 \text{ kNm}; \quad (2.32)$$

$$\frac{M_{g1}}{M_{crc}} = \frac{27,24}{11,43} = 2,38, \quad \text{Sąlyga netenkinama.} \quad (2.33)$$

Atsiveria plyšiai.

čia M_{g1} skaičiuojamas nuo charakteristinių apkrovų:

$$M_{g1} = \frac{g_1 L^2}{8} = \frac{7,21 \cdot 5500^2}{8} = 27,24 \text{ kNm}. \quad (2.34)$$

2.1.5 Plyšio pločio skaičiavimas

Plyšio plotis w_k apskaičiuojamas skaičiuojamas remiantis EN1992-1-1 7.3.4 [6]:

$$w_k = s_{r,max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = 201 \cdot 8,84 \cdot 10^{-4} = 0,18 \text{ mm}; \quad (2.35)$$

$$w_k < 0,4 \text{ mm}, \text{ sąlyga tenkinama.}$$

čia $s_{r,max}$ – maksimalus atstumas tarp plyšių;

ε_{sm} – Vidutinė armatūros deformacijų reikšmė;

ε_{cm} – Vidutinė betono deformacijų reikšmė tarp plyšių;

$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$ apskaičiuojama pagal formulę:

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} \cdot (1 + n \cdot \rho_{p,eff})}{E_s}; \quad (2.36)$$

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{309,4 - 0,6 \frac{2,9}{0,0128} \cdot (1 + 6,4 \cdot 0,0128)}{210000} = 7,73 \cdot 10^{-4};$$

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = 0,6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} = 0,6 \cdot \frac{309,4}{210000} = 8,84 \cdot 10^{-4}. \quad (2.37)$$

Skaičiavimams imama didesnė reikšmė $\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = 8,84 \cdot 10^{-4}$

čia k_t – nuo apkrovimo trukmės priklausanti reikšmė $k_t = 0,6$ trumpalaikėms apkrovoms;

$f_{ct,eff}$ – imamas kaip ir f_{ctm} ;

$$\rho_{p,eff} = \frac{A_{s1}}{A_{c,eff}} = \frac{471}{36871} = 0,0128 < 0,02; \quad (2.38)$$

$\rho_{p,eff}$ – imamas $\rho_{p,eff} = 0,0128$.

čia $A_{c,eff}$ – betono tempiamos zonos plotas:

$$A_{c,eff} = h_{c,eff} \cdot B = \frac{h - y_{cr}}{3} \cdot B = \frac{180 - 68,0}{3} \cdot 1000 = 36871 \text{ mm}^2 \quad (2.39)$$

σ_s – įtempiai armatūroje:

$$\sigma_s = n \frac{M_{Ed}}{I_{cr}} (h - a_{s1} - y_{cr}) = 6,4 \cdot \frac{37,63}{6,78 \cdot 10^7} (180 - 25 - 68,0) = 309,4 \text{ MPa}; \quad (2.40)$$

Maksimalus atstumas tarp plyšių;

$$s_{r,max} = k_3 \cdot c + \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \phi}{\rho_{p,eff}} = 3,4 \cdot 20 + \frac{0,8 \cdot 0,5 \cdot 0,425 \cdot 10}{0,02} = 201 \text{ mm}; \quad (2.41)$$

čia $c=20$ mm – išilginės armatūros apsauginis betono sluoksnis;

ϕ - darbinės armatūros skersmuo;

$k_1=0,8$ – koeficientas įvertinantis armatūros ir betono sukibimą;

k_2 – koeficientas įvertinantis įtempių pasiskirstymą, lenkiamiems elementams $k_2=0,5$;

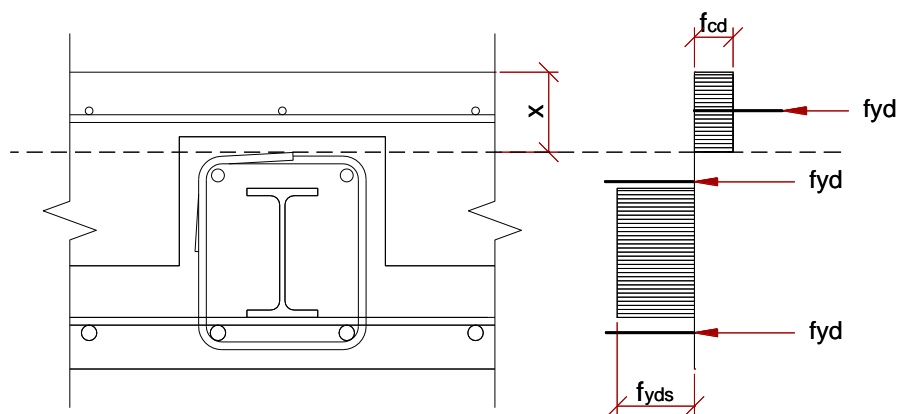
$k_3 = 3,4$; $k_4=0,425$.

2.2 Antra stadija

$$M_{Ed} = \frac{q_2 \cdot L^2}{8} = \frac{14,73 \cdot 5500^2}{8} = 55,71 \text{ kNm}; \quad (2.42)$$

$$V_{Ed} = \frac{q_2 \cdot L}{2} = \frac{14,73 \cdot 5500}{2} = 40,52 \text{ kN}; \quad (2.43)$$

2.2.1 Atsparumas lenkimui



2.3 pav. Antros stadijos skaičiuotinė schema

$$x = \frac{(A_{s1} + A_{s2} - A_{s3}) \cdot f_{yd} + A_s \cdot f_{yds}}{f_{cd} \cdot B}; \quad (2.44)$$

$$x = \frac{(471 + 157 - 170) \cdot 435 + 1030 \cdot 355}{18 \cdot 1000} = 31,39 \text{ mm},$$

čia $A_{s3} - 6\emptyset 6$, $A_{s3} = 170 \text{ mm}^2$.

Momentas skaičiuojamas pagal formulę:

$$\begin{aligned} M_{Rd} = f_{cd} \cdot B \cdot 0,5 \cdot x^2 + f_{yds} \cdot A_s \cdot \left(\frac{h_w}{2} + a_2 + h_{ct} - x \right) + f_{yd} \cdot A_{s1} \\ \cdot (H - a_{s1} - x) + f_{yd} \cdot A_{s2} \cdot (a_{s2} + h_{ct} - x) + f_{yd} \cdot A_{s3} \\ \cdot (x - a_{s2}); \end{aligned} \quad (2.45)$$

$$\begin{aligned} M_{Rd} = 18 \cdot 1000 \cdot 0,5 \cdot 31,39^2 + 355 \cdot 1030 \cdot \left(\frac{100}{2} + 40 + 40 - 31,39 \right) + 435 \cdot 471 \\ \cdot (220 - 25 - 31,39) + 435 \cdot 157 \cdot (30 + 40 - 31,39) + 435 \cdot 170 \cdot (31,39 - 30) \\ = 81,19 \text{ kNm}. \end{aligned}$$

2.2.2 Atsparumas kirpimui

Vertikalų kirpimą perima tik plienas, todėl V_{Rd} yra toks pat kaip ir pirmoje stadijoje.

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} = \frac{40,52}{103,74} = 0,39, \quad \text{Sąlyga tenkinama.} \quad (2.46)$$

2.2.3 Įlinkio skaičiavimas

Nesupleišėjusio skerspjūvio neutralios ašies padėtis nuo viršutinio paviršiaus:

$$y_{uncr} = \frac{\Sigma A_i \cdot y_i}{\Sigma A_i} \quad (2.47)$$

$$= \frac{0,5BH^2 + n(A_s \left(\frac{h_w}{2} + a_2 + h_{ct}\right) + A_{s1}(H - a_{s1}) + A_{s2}(a_{s2} + h_{ct}) + A_{s3}a_{s3})}{H \cdot B + n \cdot (A_s + A_{s1} + A_{s2} + A_{s3})};$$

y_{uncr}

$$= \frac{0,5 \cdot 1000 \cdot 220^2 + 6,4(1030 \left(\frac{100}{2} + 40 + 40\right) + 471(220 - 25) + 157(30 + 40) + 170 \cdot 30)}{220 \cdot 1000 + 6,4(1030 + 471 + 157 + 170)}$$

$$= 111,1 \text{ mm};$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį:

$$I_{uncr} = \frac{B \cdot H^3}{12} + B \cdot H \cdot \left(y_{uncr} - \frac{H}{2}\right)^2 + I_s \cdot n + A_s \cdot n \cdot \left(\frac{h_w}{2} + a_2 + h_{ct} - y_{uncr}\right)^2 + A_{s1} \cdot n \cdot (H - a_{s1} - y_{uncr})^2 + A_{s2} \cdot n \cdot (h_{ct} + a_{s2} - y_{uncr})^2 + A_{s3} \cdot n \cdot (y_{uncr} - a_{s3})^2; \quad (2.48)$$

$$I_{uncr} = \frac{1000 \cdot 220^3}{12} + 1000 \cdot 220 \cdot \left(111,1 - \frac{220}{2}\right)^2 + 1,71 \cdot 10^6 \cdot 6,4 + 1030 \cdot 6,4 \cdot \left(\frac{100}{2} + 40 + 40 - 111,1\right)^2 + 471 \cdot 6,4 \cdot (220 - 25 - 111,1)^2 + 157 \cdot 6,4 \cdot (40 + 30 - 111,1)^2 + 170 \cdot 6,4 \cdot (111,1 - 30)^2 = 9,31 \cdot 10^8 \text{ mm}^4;$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutralios ašies padėtis nuo viršutinio paviršiaus y_{cr} apskaičiuojama iš lygties:

$$\Sigma A_i \cdot y_i - \Sigma A_i \cdot y_{cr} = 0$$

$$0,5B \cdot y_{cr}^2 + A_s \cdot n \left(\frac{h_w}{2} + a_2 + h_{ct}\right) + A_{s1} \cdot n(H - a_{s1}) + A_{s2} \cdot n \cdot (a_{s2} + h_{ct}) + A_{s3} \cdot n \cdot a_{s3} - (B \cdot y_{cr} + n(A_s + A_{s1} + A_{s2} + A_{s3}))y_{cr} = 0; \quad (2.49)$$

$$0,5 \cdot 1000 \cdot y_{cr}^2 + 1030 \cdot 6,4 \left(\frac{100}{2} + 40 + 40\right) + 471 \cdot 6,4(220 - 25) + 157 \cdot 6,4 \cdot (30 + 40) + 170 \cdot 6,4 \cdot 30 - (1000 \cdot y_{cr} + 6,4(1030 + 471 + 157 + 170))y_{cr} = 0;$$

$$y_{cr} = 45,2 \text{ mm};$$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį:

$$I_{cr} = \frac{B \cdot y_{cr}^3}{3} + B \cdot y_{cr} \left(y_{cr} - \frac{y_{cr}}{2}\right)^2 + I_s \cdot n + A_s \cdot n \left(\frac{h_w}{2} + a_2 + h_{ct} - y_{cr}\right)^2 + A_{s1} \cdot n(H - a_{s1} - y_{cr})^2 + A_{s2} \cdot n(y_{cr} - (a_{s2} + h_{ct}))^2 + A_{s3} \cdot n(y_{cr} - a_{s3})^2; \quad (2.50)$$

$$\begin{aligned}
I_{cr} = & \frac{1000 \cdot 45,2^3}{3} + 1000 \cdot 45,2 \left(45,2 - \frac{45,2}{2} \right)^2 + 1,71 \cdot 10^6 \cdot 6,4 + 1030 \\
& \cdot 6,4 \left(\frac{100}{2} + 40 + 40 - 45,2 \right)^2 + 471 \cdot 6,4 (220 - 25 - 45,2)^2 + 157 \\
& \cdot 6,4 (45,2 - (30 + 40))^2 + 170 \cdot 6,4 (45,2 - 30)^2 = 1,81 \cdot 10^8 \text{ mm}^4;
\end{aligned} \tag{2.51}$$

Vidutinė supleišėjusio ir nesupleišėjusio skerspjūvio inercijos momentų reikšmė:

$$I_{vid} = \frac{I_{uncr} + I_{cr}}{2} = \frac{9,31 \cdot 10^8 + 1,81 \cdot 10^8}{2} = 5,56 \cdot 10^8 \text{ mm}^4; \tag{2.52}$$

Perdangos įlinkis antroje stadijoje, kai visi sluoksniai dirba kaip vientisas elementas:

$$\delta_2 = \frac{5}{384} \cdot \frac{g_2 \cdot L^4}{E_{cm} I_{vid}} = \frac{5}{384} \cdot \frac{10,58 \cdot 5500^4}{32800 \cdot 5,56 \cdot 10^8} = 6,9 \text{ mm}; \tag{2.53}$$

čia: g_2 - charakteristinė apkrovų reikšmė.

$$\delta_{max} = \frac{L}{250} = \frac{5500}{250} = 22,0 \text{ mm}; \tag{2.54}$$

δ_{max} – didžiausias leistinas įlinkis.

$$\frac{\delta_2}{\delta_{max}} = \frac{6,9}{22} = 0,31, \quad \text{Sąlyga tenkinama.} \tag{2.55}$$

Įlinkis tik nuo uždėtų charakteristinių apkrovų atsirandančių antroje stadijoje, be savo svorio:

$$\delta_{2l} = \frac{5}{384} \cdot \frac{(g_i + q_i) \cdot L^4}{E_{cm} I_{vid}} = \frac{5}{384} \cdot \frac{(2 + 3) \cdot 5500^4}{32800 \cdot 5,56 \cdot 10^8} = 3,3 \text{ mm}; \tag{2.56}$$

Suminis įlinkis:

$$\delta_{\Sigma} = \delta_1 + \delta_{2l} = 15,8 + 3,3 = 19,1 \text{ mm}. \tag{2.57}$$

$$\delta_{max} = \frac{L}{250} = 22 \text{ mm}; \tag{2.58}$$

$$\frac{\delta_{\Sigma}}{\delta_{max}} = \frac{19,1}{22} = 0,87, \quad \text{Sąlyga tenkinama.} \tag{2.59}$$

2.2.4 Rezultatai

Skaičiuojant šią konstrukciją buvo leistinas plyšių atsivėrimas, konstrukcijos kritinis rodiklis yra maksimalus leistinas įlinkis.

Konstrukcijos aukštis $H=220$ mm, o savasis svoris 528 kg/m².

2.1 lentelė. Antros konstrukcijos mechaninės savybės

1 stadija					2 stadija			
M_{Rd} , kNm	V_{Rd} , kN	δ_1 , mm	M_{crc} , kNm	w_k , mm	M_{Rd} , kNm	V_{Rd} , kN	δ_2 , mm	δ_Σ , mm
40,88 92%	103,74 26%	15,8 79%	11,43 238%	0,20	81,19 69%	103,74 39%	6,9 31%	19,1 87%

2.2 lentelė. Antros konstrukcijos medžiagų kiekiai ir jų kainos

Medžiaga	Betonas	Plienas	Armatūra	Σ
Kiekis, kg/m ²	528	8,1	8,9	545
Kaina, eur/m ²	16,26	5,67	8,66	30,59

2.2.5 Rezultatai, kai pirmoje stadijoje neleidžiamas plyšys

Siekiant, kad konstrukcijoje neatsivertų plyšys, tais pačiais skaičiavimais „Excel“ programa buvo suprojektuotas antras šios konstrukcijos variantas ir gauti tokie rezultatai:

konstrukcijos aukštis $H=320$ mm, o savasis svoris 814 kg/m². Plieninė sija IPE 200, liktinio klojinio sienutės $h=280$ mm $b=250$ mm, lentynos $h_g=80$ mm, $A_{s1}=10\phi 14=1539$ mm², $A_{s2}=2\phi 25=982$ mm².

2.3 Antros konstrukcijos, be plyšių, mechaninės savybės

1 stadija				2 stadija				
M_{Rd} , kNm	V_{Rd} , kN	δ_1 , mm	M_{crc} , kNm	M_{Rd} , kNm	V_{Rd} , kN	δ_2 , mm	M_{crc} , kNm	δ_Σ , mm
225,03 23%	287,27 13%	3,6 18%	37,81 99%	321,39 22%	287,27 18%	2,3 11%	66,32 75%	4,5 20%

2.4 Antros konstrukcijos, be plyšių, medžiagų kiekiai ir jų kainos

Medžiaga	Betonas	Plienas	Armatūra	Σ
Kiekis, kg/m ²	768	22,4	23,8	814
Kaina, eur/m ²	23,65	16,13	23,06	62,84

3. KOMPOZITINĖS PLOKŠTĖS SU PUSIAU ĮBETONUOTAIS PLIENO PROFILIAIS

Kompozitinė konstrukcija gaminama iš surenkamų gelžbetoninių plokščių su pusiau įbetonuotomis plieninėmis sijomis ir statybos metu ant viršaus užpilamu betono sluoksniu. Surenkama gelžbetoninė plokštė skaičiuojama kaip dviatramė sija, išskiriamos yra dvi darbo stadijos: pirmą užpiltas šlapias betonas dar nesukietėjo ir antra, kai viršutinė dalis pasiekia savo projektinį stiprį.

Betonas:

$$C30/37; f_{cd} = 0,9 \cdot \frac{30}{1,5} = 18 \text{ MPa}; f_{ctm} = 2,9 \text{ MPa}; f_{ctk} = 2.0 \text{ MPa}; E_{cm} = 32800 \text{ MPa};$$

Armatūra:

$$f_y=500 \text{ MPa}; \gamma_s=1,15; f_{yd} = \frac{500}{1,15} = 434,8 \text{ MPa}; E_s=210000 \text{ MPa};$$

Plienas IPE 120:

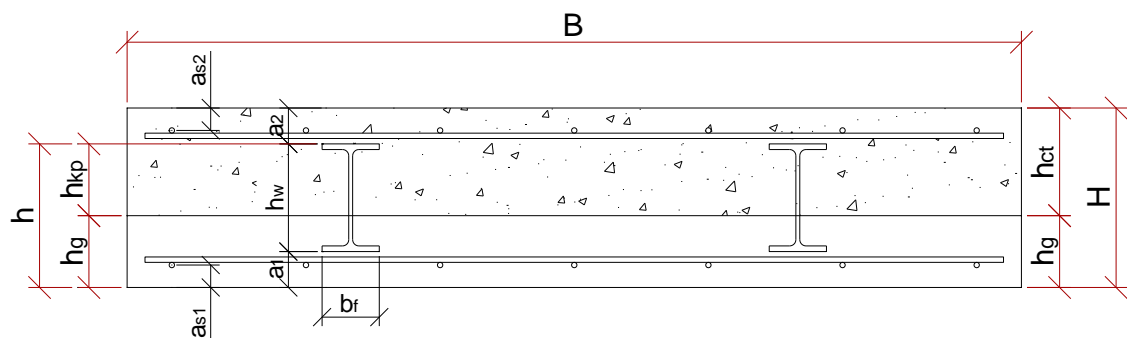
$$f_y=355 \text{ MPa}; \gamma_s=1,0; f_{yds} = \frac{355}{1,0} = 355 \text{ MPa}; E_s=210000 \text{ MPa};$$

Dedami du plieno profiliai, todėl į ploto, pločio, atsparumo momento ir inercijos momento reikšmės yra dvigubai didesnės už vieno profilio.

$$A_s=2640 \text{ mm}^2; m=20,8 \text{ kg/m}; b_f=128 \text{ mm}; h_w=120 \text{ mm}; t_w=8,8 \text{ mm}; t_f=6,3 \text{ mm}; \text{rad}=7;$$

$$W_{pl}=1,21 \cdot 10^5 \text{ mm}^3; I_s=6,36 \cdot 10^6 \text{ mm}^4;$$

$$n = \frac{E_s}{E_{cm}} = \frac{210000}{32800} = 6,4.$$



3.1 Skaičiuojamos konstrukcijos skerspjūvis

$$L=5500 \text{ mm};$$

$$a_1=40 \text{ mm};$$

$$B=1000 \text{ mm};$$

$$a_2=40 \text{ mm};$$

$$H=200 \text{ mm};$$

$$a_{s1}=30 \text{ mm};$$

$$h=160 \text{ mm};$$

$$a_{s2}=30 \text{ mm};$$

$$h_g=80 \text{ mm};$$

$$h_{gp}=80 \text{ mm};$$

Stadija		Apkrovos pavadinimas	
I stadija	Nuolatinė apkrova G_1 , kN/m^2	Betonas ($25kN/m^3$)	2,0
		Plienas 2 Vnt.	0,42
		Šlapias betonas ($26kN/m^3$)	3,12
		Užtvenkimo efektas ($26kN/m^3$)	0,00
		$\Sigma G_1=$	5,54
	Kintama apkrova Q_1 , kN/m^2	Montavimo	0,75
		Darbo aikštelė 3x3 m	0,75
		$\Sigma Q_1=$	1,50
		$g_1=$	7,04
II stadija	Nuolatinė apkrova G_2 , kN/m^2	Betonas ($25kN/m^3$)	2,0
		Plienas	0,42
		Sukietėjęs betonas	3,0
		Apdaila, komunikacija, pertvaros	2,0
		$\Sigma G_1=$	7,42
	Kintama apkrova Q_2 , kN/m^2	Naudojimo	3
		$\Sigma Q_2=$	3
		$g_2=$	10,42

čia $q_1 = 1,35 \cdot 5,54 + 1,5 \cdot 1,5 = 9,72 \text{ kN/m}^2$ – skaičiuotinės apkrovos pirmoje stadijoje;
 $q_2 = 1,35 \cdot 7,42 + 1,5 \cdot 3,0 = 14,51 \text{ kN/m}^2$ – skaičiuotinės apkrovos antroje stadijoje;
 g_1 – charakteristinės apkrovos pirmoje stadijoje;
 g_2 – charakteristinės apkrovos antroje stadijoje;

3.1 Pirma stadija

Išorinių apkrovų sukeltas skaičiuojamasis momentas ir kirpimas:

$$M_{Ed} = \frac{q_1 \cdot L^2}{8} = \frac{9,72 \cdot 5500^2}{8} = 38,80 \text{ kNm}; \quad (3.1)$$

$$V_{Ed} = \frac{q_1 \cdot L}{2} = \frac{9,72 \cdot 5500}{2} = 27,47 \text{ kN}; \quad (3.2)$$

3.1.1 Atsparumas lenkimui:

Neutrali ašis apskaičiuojama iš jėgų pusiausvyros x ašyje – tempimo jėgų suma tempiamoje zonoje turi būti lygi gniuždymo jėgų sumai gniuždomoje zonoje.

Priartėjimo būdu skaičiuojamas x , kol tenkinama ši sąlyga:

$$F_{St} + F_{a1} = F_{Cc} + F_{Sc}; \quad (3.3)$$

$$417,1 + 73,9 = 0 + 491,0;$$

Gauname – $x=71,8$ mm.

$$F_{St} = f_{yds} \cdot (b_f \cdot t_f + t_w \cdot (h_w - x - t_f)); \quad (3.4)$$

$$F_{St} = 355 \cdot (128 \cdot 6,3 + 8,8 \cdot (120 - x - 6,3)) = 417,1 \text{ kN};$$

$$F_{Cc} = f_{cd} \cdot (B \cdot (x - h_{kp}) - t_w \cdot t_f); \quad (3.5)$$

$$F_{Cc} = 18 \cdot (1000 \cdot (x - 80) - 8,8 \cdot 6,3) = 0 \text{ kN},$$

$F_{Cc} = 0 \text{ kN}$ – kadangi visas betonas yra tempiamas;

$$F_{Sc} = f_{yds} \cdot (b_f \cdot t_f + t_w \cdot (x - t_f)); \quad (3.6)$$

$$F_{Sc} = 355 \cdot (128 \cdot 6,3 + 8,8 \cdot (x - 6,3)) = 491,0 \text{ kN};$$

čia: F_{St} - tempiamos plieninės sijos dalies jėga;

F_{Sc} - gniuždomos plieninės sijos dalies jėga;

F_{Cc} - betono gniuždomosios zonos jėga.

$F_{a1} = A_{s1} \cdot f_{yd} = 170 \cdot 435 = 73,9 \text{ kN}$ – tempiamą armatūrą;

$A_{s1} = 6\phi 6 = 170 \text{ mm}^2$;

$$y_{St} = \frac{t_w \cdot 0,5 \cdot (h_w - x - t_f)^2 + b_f \cdot t_f \cdot (h_w - x - \frac{t_f}{2})}{(t_w \cdot (h_w - x - t_f) + b_f \cdot t_f)}; \quad (3.7)$$

$$y_{St} = \frac{8,8 \cdot 0,5 \cdot (120 - 71,8 - 6,3)^2 + 128 \cdot 6,3 \cdot (120 - 71,8 - \frac{6,3}{2})}{(8,8 \cdot (120 - 71,8 - 6,3) + 128 \cdot 6,3)} = 37,5 \text{ mm};$$

$$y_{Sc} = \frac{t_w \cdot 0,5 \cdot (x - t_f)^2 + b_f \cdot t_f \cdot (x - \frac{t_f}{2})}{(t_w \cdot (x - t_f) + b_f \cdot t_f)}; \quad (3.8)$$

$$y_{Sc} = \frac{8,8 \cdot 0,5 \cdot (71,8 - 6,3)^2 + 128 \cdot 6,3 \cdot (71,8 - \frac{6,3}{2})}{(8,8 \cdot (71,8 - 6,3) + 128 \cdot 6,3)} = 53,7 \text{ mm};$$

$$y_{Cc} = \frac{x - h_{kp}}{2} = \frac{71,8 - 80}{2} = -4,1 \text{ mm}; \quad (3.9)$$

$$y_{a1} = h - x - a_{s1} = 160 - 71,8 - 30 = 58,2 \text{ mm}; \quad (3.10)$$

čia: y_{st} – plieninės sijos tempiamosios dalies masės centro atstumas iki x ;

y_{sc} – plieninės sijos gniuždomosios dalies masės centro atstumas iki x ;

y_{Cc} – betono gniuždomosios zonos masės centro atstumas iki x ;

y_{a1} – tempiamos armatūros atstumas iki x ;

y_{a2} – gniuždomos armatūros atstumas iki x .

Momento laikomoji galia:

$$M_{Rd} = F_{St} \cdot y_{St} + F_{Cc} \cdot y_{Cc} + F_{Sc} \cdot y_{Sc} + F_{a1} \cdot y_{a1}; \quad (3.11)$$

$$M_{Rd} = 417,1 \cdot 37,5 + 0 \cdot (-4,1) + 491,0 \cdot 53,7 + 73,9 \cdot 58,2 = 46,29 \text{ kNm};$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} = \frac{38,80}{46,29} = 0,84, \quad \text{Sąlyga tenkinama.} \quad (3.12)$$

3.1.2 Atsparumas kirpimui

Skaičiuojama, kad kirpimo jėgą perima plienas. Skaičiavimas atliekamas pagal EN 1993-1-1 6.2.6 [5].

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_{yds}}{\sqrt{3}} = 1171 \frac{355}{\sqrt{3}} = 239,97 \text{ kN}; \quad (3.13)$$

$$A_v = A_s - b_f \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot rad) \cdot t_f = \quad (3.14)$$

$$2640 - 128 \cdot 6,3 + (8,8 + 2 \cdot 7) \cdot 6,3 = 1171 \text{ mm}^2.$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} = \frac{27,47}{239,97} = 0,11, \quad \text{Sąlyga tenkinama.} \quad (3.15)$$

3.1.3 Įlinkio skaičiavimas

Įlinkio skaičiavimas atliekamas su prielaida, kad tarp plieno ir betono yra užtikrinamas mechaninis sukibimas.

Nesupleišėjusio skerspjūvio neutralios ašies padėtis nuo viršutinio paviršiaus:

$$y_{uncr} = \frac{\sum A_i \cdot y_i}{\sum A_i} = \frac{B \cdot h_g \cdot (h_{kp} + \frac{h_g}{2}) + A_s \cdot n \cdot (\frac{h_w}{2}) + A_{s1} \cdot n \cdot (h - a_{s1})}{h_g \cdot B + n \cdot (A_s + A_{s1})}; \quad (3.16)$$

$$y_{uncr} = 109,8 \text{ mm};$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį:

$$I_{uncr} = \frac{B \cdot h_g^3}{12} + b_t \cdot h_g \cdot \left(\left(h - \frac{h_g}{2} \right) - y_{uncr} \right)^2 + A_s \cdot n \left(\frac{h_w}{2} - y_{cr} \right)^2 + n \cdot I_s + A_{s1} \cdot n \cdot (h - a_{s1} - y_{uncr})^2; \quad (3.17)$$

$$I_{uncr} = 1,34 \cdot 10^8 \text{ mm}^4;$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutralios ašies padėtis nuo viršutinio paviršiaus:

$$y_{cr} = \frac{\sum A_i \cdot y_i}{\sum A_i} = \frac{A_s \cdot n \left(\frac{h_w}{2} \right) + A_{s1} \cdot n (h - a_{s1})}{n(A_s + A_{s1})} \quad (3.18)$$

$$y_{cr} = 64,2 \text{ mm};$$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį:

$$I_{cr} = n \cdot I_s + A_s \cdot n \left(\frac{h_w}{2} - y_{cr} \right)^2 + A_{s1} \cdot n (h - a_{s1} - y_{cr})^2; \quad (3.19)$$

$$I_{cr} = 4,57 \cdot 10^7 \text{ mm}^4;$$

$$I_{vid} = \frac{I_{uncr} + I_{cr}}{2} = \frac{1,34 \cdot 10^8 + 4,57 \cdot 10^7}{2} = 8,99 \cdot 10^7 \text{ mm}^4; \quad (3.20)$$

Perdangos įlinkis pirmoje stadijoje dar nesukietėjus viršutiniam betono sluoksniui:

$$\delta_1 = \frac{5}{384} \cdot \frac{G_1 \cdot L^4}{E_{cm} I_{vid}} = \frac{5}{384} \cdot \frac{5,54 \cdot 5500^4}{32800 \cdot 8,99 \cdot 10^7} = 16,7 \text{ mm}; \quad (3.21)$$

čia: G_1 - nuolatinių apkrovų charakteristinė reikšmė.

3.1.4 Atsparumas pleišėjimui

Apskaičiuojamas atstumas nuo masės centro iki labiausiai tempiamo paviršiaus:

$$y_t = h - y_{uncr} = 160 - 109,8 = 50,2 \text{ mm}. \quad (3.22)$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį, nevertinant plieno:

$$I_{eff} = \frac{B \cdot h^3}{12} + B \cdot h \cdot \left(y_{uncr} - \frac{h}{2}\right)^2 + A_{s1} \cdot n \cdot (h - a_{s1} - y_{uncr})^2; \quad (3.23)$$

$$\begin{aligned} I_{eff} &= \frac{1000 \cdot 160^3}{12} + 1000 \cdot 160 \cdot \left(109,8 - \frac{160}{2}\right)^2 + 170 \cdot 6,4 \cdot (160 - 30 - 109,8)^2 \\ &= 5,15 \cdot 10^7 \text{ mm}^4; \end{aligned}$$

Gelžbetoninio elemento tempiamos zonos plastinis atsparumo momentas:

$$W_{pl1} = 1,75 \cdot \frac{I_{eff}}{y_t} = 1,75 \cdot \frac{5,15 \cdot 10^7}{50,2} = 1,79 \cdot 10^6 \text{ mm}^4; \quad (3.24)$$

Plastinis plieninio elemento atsparumo momentas:

$$W_I^{pl} = 1,17 \cdot W_{pl} + \left(\frac{h_w}{2} - y_{uncr}\right) \cdot t_w; \quad (3.25)$$

$$= 1,17 \cdot 1,21 \cdot 10^5 + \left(\frac{120}{2} - 109,8\right) \cdot 8,8 = 1,64 \cdot 10^5 \text{ mm}^4;$$

čia $W_{pl} = 1,21 \cdot 10^5 \text{ mm}$ – dviejų plieninių profilių atsparumo modulis.

Pleišėjimo momentas:

$$\begin{aligned} M_{crc} &= f_{ctk} \cdot (W_{pl1} + n \cdot W_I^{pl}) = 2,0 \cdot (1,79 \cdot 10^6 + 6,4 \cdot 1,64 \cdot 10^5) \\ &= 5,76 \text{ kNm}; \end{aligned} \quad (3.26)$$

$$\frac{M_{g1}}{M_{crc}} = \frac{26,6}{5,76} = 4,62, \quad \text{Sąlyga netenkinama.} \quad (3.27)$$

Atsiveria plyšiai.

M_{g1} skaičiuojamas nuo charakteristinės apkrovų:

$$M_{g1} = \frac{g_1 L^2}{8} = \frac{7,04 \cdot 5500^2}{8} = 26,60 \text{ kNm}. \quad (3.28)$$

3.1.5 Plyšio pločio skaičiavimas

Plyšio plotis w_k apskaičiuojamas skaičiuojamas remiantis EN1992-1-1 7.3.4 [6]:

$$w_k = s_{r,max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = 259 \cdot 1,02 \cdot 10^{-3} = 0,26 \text{ mm}; \quad (3.29)$$

$w_k < 0,4 \text{ mm}$, sąlyga tenkinama,

čia $s_{r,max}$ - maksimalus atstumas tarp plyšių;

ε_{sm} – Vidutinė armatūros deformacijų reikšmė;

ε_{cm} – Vidutinė betono deformacijų reikšmė tarp plyšių;

$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$ apskaičiuojama pagal formulę:

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} \cdot (1 + n \cdot \rho_{p,eff})}{E_s}; \quad (3.30)$$

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{357,3 - 0,6 \frac{2,9}{0,0054} \cdot (1 + 6,4 \cdot 0,0054)}{210000} = 1,04 \cdot 10^{-4};$$

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = 0,6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} = 0,6 \cdot \frac{357,3}{210000} = 1,02 \cdot 10^{-3}; \quad (3.31)$$

Skaičiavimams imama mažesnė reikšmė $\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = 1,02 \cdot 10^{-3}$,

čia k_t – nuo apkrovimo trukmės priklausanti reikšmė $k_t = 0,6$ trumpalaikėms apkrovoms;

$f_{ct,eff}$ – imamas kaip ir f_{ctm} ;

$$\rho_{p,eff} = \frac{A_{s1}}{A_{c,eff}} = \frac{170}{31752} = 0,0054 < 0,02; \quad (3.32)$$

$\rho_{p,eff}$ – imamas $\rho_{p,eff} = 0,0054$.

čia $A_{c,eff}$ – betono tempiamos zonos plotas:

$$\begin{aligned} A_{c,eff} &= h_{c,eff} \cdot B = \frac{h - y_{cr}}{3} \cdot B - A_{s1} = \frac{160 - 64,2}{3} \cdot 1000 - 15 \\ &= 31752 \text{ mm}^2; \end{aligned} \quad (3.33)$$

σ_s – įtempiai armatūroje:

$$\sigma_s = n \frac{M_{Ed}}{I_{cr}} (h - a_{s1} - y_{cr}) = 6,4 \cdot \frac{38,80}{4,57 \cdot 10^7} (160 - 30 - 64,2) = 357,3 \text{ MPa}; \quad (3.34)$$

Maksimalus atstumas tarp plyšių;

$$s_{r,max} = k_3 \cdot c + \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \emptyset}{\rho_{p,eff}} = 3,4 \cdot 20 + \frac{0,8 \cdot 0,5 \cdot 0,425 \cdot 6}{0,0054} = 259 \text{ mm}; \quad (3.35)$$

čia $c=20 \text{ mm}$ – išilginės armatūros apsauginis betono sluoksnis;

\emptyset - darbinės armatūros skersmuo $d=6 \text{ mm}$;

$k_1=0,8$ – koeficientas įvertinantis armatūros ir betono sukibimą;

k_2 – koeficientas įvertinantis įtempių pasiskirstymą, lenkiamiems elementams $k_2=0,5$;

$k_3 = 3,4$; $k_4=0,425$.

3.2 Antra stadija

Antroje stadijoje betonas sukietėja ir konstrukcija dirba kaip vientisas elementas. Apkrovų poveikiai:

$$M_{Ed} = \frac{q_2 \cdot L^2}{8} = \frac{14,51 \cdot 5500^2}{8} = 57,91 \text{ kNm}; \quad (3.36)$$

$$V_{Ed} = \frac{q_2 \cdot L}{2} = \frac{14,51 \cdot 5500}{2} = 41,00 \text{ kN}; \quad (3.37)$$

3.2.1 Atsparumas lenkimui

Neutrali ašis apskaičiuojama iš jėgų pusiausvyros x ašyje, tempimo jėgų suma tempiamoje zonoje turi būti lygi gniuždymo jėgų sumai gniuždomoje zonoje:

$$F_{Cc} = f_{cd} \cdot B \cdot a_2 = 18 \cdot 1000 \cdot 40 = 720 \text{ kN} - \text{gniuždomas betonas};$$

$$F_{St} = A_s \cdot f_{yds} = 2640 \cdot 355 = 937 \text{ kN} - \text{tempiamas plienas};$$

$$F_{St} > F_{Cc}, \text{ tai reiškia, kad } x > a_2; \text{ } x \text{ kerta plieno profilį.}$$

Numanoma, kad x yra viršutinėje plieno profilio lentynoje. Skaičiuojama priartėjimo būdu, tol kol tenkinama ši sąlyga:

$$F_{St} + F_{a1} = F_{Cc} + F_{Sc} + F_{a2}; \quad (3.38)$$
$$827,88 + 73,91 = 747,70 + 80,18 + 73,91;$$

Gauname $x=41,8$ mm.

$$F_{St} = f_{yds} \cdot (b_f \cdot t_f + t_w \cdot (h_w - 2 \cdot t_f) + b_f \cdot (a_2 + t_f - x));$$
$$F_{St} = 355 \cdot (128 \cdot 6,3 + 8,8 \cdot (120 - 2 \cdot 6,3) + 128 \cdot (40 + 6,3 - x)) \quad (3.39)$$
$$= 827,88 \text{ kN};$$

$$F_{a1} = f_{yd} \cdot A_{s1} = 435 \cdot 170 = 73,91 \text{ kN}; \quad (3.40)$$

$$F_{Cc} = f_{cd} \cdot (B \cdot x - b_f \cdot (x - a_2));$$
$$F_{Cc} = 18 \cdot (1000 \cdot x - 128 \cdot (x - 40)) = 747,7 \text{ kN}; \quad (3.41)$$

$$F_{Sc} = f_{yds} \cdot (b_f \cdot (x - a_2)) = 355 \cdot (128 \cdot (x - 40)) = 80,18 \text{ kN}; \quad (3.42)$$

$$F_{a2} = f_{yd} \cdot A_{s2} = 435 \cdot 170 = 73,91 \text{ kN}; \quad (3.43)$$

čia: F_{St} - tempiamos plieninės sijos dalies jėga;

F_{Sc} - gniuždomos plieninės sijos dalies jėga;

F_{Cc} - betono gniuždomosios zonos jėga

Atsparumas lenkimui:

$$M_{Rd} = F_{St} \cdot y_{St} + F_{Cc} \cdot y_{Cc} + F_{Sc} \cdot y_{Sc} + F_{a1} \cdot y_{a1} + F_{a2} \cdot y_{a2};$$

$$\begin{aligned} M_{Rd} &= 827,88 \cdot 79,7 + 747,7 \cdot 20,9 + 80,18 \cdot 0,9 + 73,91 \cdot 128,2 + 73,91 \cdot 11,8 \\ &= 91,98 \text{ kNm}; \end{aligned} \quad (3.44)$$

$$y_{St} = \frac{t_w(h_w - 2t_f) \left(\frac{(h_w - 2t_f)}{2} + a_2 - x \right) + b_f t_f \left(a_2 + h_w - \frac{t_f}{2} - x \right) + b_f(x - a_2) \left(x - \frac{(x - a_2)}{2} \right)}{(t_w \cdot (h_w - 2t_f) + b_f \cdot t_f + b_f \cdot (x - a_2))}; \quad (3.45)$$

$$y_{St} = 79,7 \text{ mm};$$

$$y_{Sc} = \frac{x - a_2}{2} = \frac{41,8 - 40}{2} = 0,9 \text{ mm}; \quad (3.46)$$

$$y_{Cc} = \frac{x}{2} = \frac{41,8}{2} = 20,9 \text{ mm}; \quad (3.47)$$

$$y_{a1} = H - x - a_{s1} = 200 - 41,8 - 30 = 128,2 \text{ mm}; \quad (3.48)$$

$$y_{a2} = x - a_{s2} = 41,8 - 30 = 11,8 \text{ mm}; \quad (3.49)$$

čia: y_{St} - plieninės sijos tempiamosios dalies svorio centro atstumas iki x ;

y_{Sc} - plieninės sijos gniuždomosios dalies svorio centro atstumas iki x ;

y_{Cc} - betono gniuždomosios zonos svorio centro atstumas iki x ;

y_{a1} - tempiamos centro armatūros atstumas iki x ;

y_{a2} - gniuždomos centro armatūros atstumas iki x .

3.2.2 Atsparumas kirpimui

Vertikalų kirpimą perima tik plienas, todėl V_{Rd} yra toks pat kaip ir pirmoje stadijoje.

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} = \frac{40,00}{239,97} = 0,17, \quad \text{Sąlyga tenkinama.} \quad (3.50)$$

3.2.3 Įlinkio skaičiavimas

Nesupleišėjusio skerspjuvio neutralios ašies padėtis nuo viršutinio paviršiaus:

$$y_{uncr} = \frac{\Sigma A_i \cdot y_i}{\Sigma A_i} = \frac{0,5 \cdot B \cdot H^2 + 2 \cdot A_s \cdot n \cdot \left(\frac{h_w}{2} + a_2\right) + A_{s1} \cdot n \cdot (H - a_{s1}) + A_{s2} \cdot n \cdot a_{s2}}{H \cdot B + n \cdot (2 \cdot A_s + A_{s1} + A_{s2})}; \quad (3.51)$$

$$y_{uncr} = 100,0 \text{ mm};$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį:

$$I_{uncr} = \frac{B \cdot H^3}{12} + B \cdot H \cdot \left(y_{uncr} - \frac{H}{2}\right)^2 + I_s \cdot n + A_s \cdot n \cdot \left(\frac{h_w}{2} + a_2 - y_{uncr}\right)^2 + A_{s1} \cdot n \cdot (H - a_{s1} - y_{uncr})^2 + A_{s2} \cdot n \cdot (y_{uncr} - a_{s1})^2; \quad (3.52)$$

$$I_{uncr} = 7,18 \cdot 10^8 \text{ mm}^4;$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutralios ašies padėtis nuo viršutinio paviršiaus y_{cr} apskaičiuojas iš lygties:

$$\Sigma A_i \cdot y_i - \Sigma A_i \cdot y_{cr} = 0; \quad (3.53)$$

$$0,5B \cdot y_{cr}^2 + A_s \cdot n \left(\frac{h_w}{2} + a_2\right) + A_{s1} \cdot n(H - a_{s1}) + A_{s2} \cdot n \cdot a_{s2} - (B \cdot y_{cr} + n(A_s + A_{s1} + A_{s2}))y_{cr} = 0;$$

$$y_{cr} = 34,02 \text{ mm};$$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį:

$$I_{cr} = \frac{B \cdot y_{cr}^3}{3} + B \cdot y_{cr} \left(y_{cr} - \frac{y_{cr}}{2}\right)^2 + 2 \cdot I_s + 2 \cdot A_s \cdot n \left(\frac{h_w}{2} + a_2 - y_{cr}\right)^2 + A_{s1} \cdot n(h - a_{s1} - y_{cr})^2 + A_{s2} \cdot n(y_{cr} - a_{s2})^2; \quad (3.54)$$

$$I_{cr} = 1,23 \cdot 10^8 \text{ mm}^4;$$

Vidutinė supleišėjusio ir nesupleišėjusio skerspjūvio inercijos momentų reikšmė:

$$I_{vid} = \frac{I_{uncr} + I_{cr}}{2} = \frac{7,18 \cdot 10^8 + 1,23 \cdot 10^8}{2} = 4,21 \cdot 10^8 \text{ mm}^4; \quad (3.55)$$

Perdangos įlinkis antroje stadijoje, kai visi sluoksniai dirba kaip vientisas elementas:

$$\delta_2 = \frac{5}{384} \cdot \frac{g_2 \cdot L^3}{E_{cm} I_{vid}} = \frac{5}{384} \cdot \frac{10,42 \cdot 5500^4}{32800 \cdot 4,21 \cdot 10^8} = 10,0 \text{ mm}; \quad (3.56)$$

čia: g_2 - charakteristinė apkovų reikšmė.

$$\delta_{max} = \frac{L}{250} = \frac{5500}{250} = 22,0 \text{ mm}; \quad (3.57)$$

δ_{max} – didžiausias leistinas įlinkis.

$$\frac{\delta_2}{\delta_{max}} = \frac{10,0}{22} = 0,44, \quad \text{Sąlyga tenkinama.} \quad (3.58)$$

Įlinkis tik nuo uždėtų charakteristinių apkrovų atsirandančių antroje stadijoje, be savo svorio:

$$\delta_{2l} = \frac{5}{384} \cdot \frac{(g_i + q_i) \cdot L^4}{E_{cm} I_{vid}} = \frac{5}{384} \cdot \frac{(2 + 3) \cdot 5500^4}{32800000 \cdot 4,21 \cdot 10^8} = 4,8 \text{ mm}; \quad (3.59)$$

Suminis įlinkis:

$$\delta_{\Sigma} = \delta_1 + \delta_{2l} = 16,7 + 4,8 = 19,1 \text{ mm.} \quad (3.60)$$

$$\delta_{max} = \frac{L}{250} = 22 \text{ mm}; \quad (3.61)$$

$$\frac{\delta_{\Sigma}}{\delta_{max}} = \frac{21,5}{22} = 0,95, \quad \text{Sąlyga tenkinama.} \quad (3.62)$$

3.2.4 Rezultatai

Skaičiuojant šią konstrukciją buvo leistinas plyšių atsivėrimas, konstrukcijos kritinis rodiklis yra maksimalus leistinas įlinkis.

Konstrukcijos aukštis $H=200$ mm, o savasis svoris 506 kg/m^2 .

3.2 lentelė. Trečios konstrukcijos mechaninės savybės

1 stadija					2 stadija			
M_{Rd} , kNm	V_{Rd} , kN	δ_1 , mm	M_{erc} , kNm	w_k , mm	M_{Rd} , kNm	V_{Rd} , kN	δ_2 , mm	δ_{Σ} , mm
46,29	239,97	16,7	5,76	0,26	91,98	239,97	10,0	21,5
84%	11%	84%	462%		63%	17%	44%	95%

3.3 lentelė. Trečios konstrukcijos medžiagų kiekiai ir jų kainos

Medžiaga	Betonas	Plienas	Armatūra	Σ
Kiekis, kg/m^2	480	20,8	5,3	506
Kaina, eur/m^2	14,78	14,56	5,17	34,52

3.2.5 Rezultatai, kai pirmoje stadijoje neleidžiamas plyšys

Siekiant, kad konstrukcijoje neatsivertu plyšys, tais pačiais skaičiavimais „Excel“ programa buvo suprojektuotas antras šios konstrukcijos variantas ir gauti tokie rezultatai:

Konstrukcijos aukštis $H=300$ mm, o savasis svoris 1044 kg/m². Plieninė sija HEM 200, liktinio klojinio $h_g=80$ mm, $A_{s1}=10\emptyset 10=785$ mm², $A_{s2}=10\emptyset 10=785$ mm².

3.4 Trečios konstrukcijos, be plyšių, mechaninės savybės

1 stadija				2 stadija				
M_{Rd} , kNm	V_{Rd} , kN	δ_1 , mm	M_{crc} , kNm	M_{Rd} , kNm	V_{Rd} , kN	M_{crc} , kNm	w_k , mm	δ_{Σ} , mm
1224,08 8%	2155,15 3%	2,2 11%	70,32 99%	1381,60 8%	2155,15 4%	64,87 108%	0,04	2,7 12%

3.5 Trečios konstrukcijos, be plyšių, medžiagų kiekiai ir jų kainos

Medžiaga	Betonas	Plienas	Armatūra	Σ
Kiekis, kg/m ²	720	309	15,0	1044
Kaina, eur/m ²	22,17	241,02	14,53	277,73

Matome, kad užtikrinti plyšių nebuvimą perdangos pirmoje stadijoje yra visiškai neefektyvu, nes dviejų plieninių sijų - HEM 200 kaina yra labai didelė (241 eur/m), lyginant su kitomis konstrukcijomis.

4. KIAURYMĖTA PERDANGOS PLOKŠTĖ

Kiaurymėtos perdangos plokštės parinkimas paremtas UAB „BLOKELIŲ CENTRAS” pateikta informacija [20].

KIAURYMĖTOS PLOKŠTĖS VPL 20

Plokštė	Aukštis, mm	Plotis, mm	Naudojimo sąlygų klasė	Atsparumo ugniai klasė	Skaičiuotinė apkrova be nuosavo svorio, kPa											
					5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Didžiausias leistinas skaičiuotinis plokštės ilgis, m																
VPL20-F6D	200	1200	XO-XC1	REI 60	9.40	8.66	8.37	8.03	7.72	7.44	7.19	6.96	6.76	6.57	6.40	6.24
VPL20-F6D(X)	200	1200	XC2-XA2	REI 60	8.04	7.64	7.29	6.99	6.73	6.49	6.27	6.08	5.90	5.74	5.59	5.45
VPL20-F9D	200	1200	XO-XC1	REI 90	8.76	8.44	8.14	7.79	7.49	7.22	6.98	6.76	6.56	6.38	6.21	6.06
VPL20-F9D(X)	200	1200	XC2-XA2	REI 90	7.81	7.42	7.08	6.79	6.53	6.30	6.09	5.90	5.73	5.57	5.42	5.29

Pastaba:

Plokštės 1 m svoris 3,66 kN/m;

Plokštės 1 m svoris su siūlių užtaisymu 3,84 kN/m.

4.1 pav. Kiaurymėtu perdangų gaminto teikiama informacija

Ekonominiame palyginime bus naudojama VPL 200 kiaurymėta perdangos plokštė, nes ji gali padengti iki 9,4 m tarpatramį esant 5 kPa apkrovai. Kiaurymėtos perdangos kaina – 21,11 eur/m².

5. PALYGINIMAS

5.1 Mechaninės savybės.

Lyginamos keturios konstrukcijos:

1. kompozitinė perdanga ant profiliuoto pakloto;
2. kompozitinė perdanga su viena pilnai įbetonuota sija;
3. kompozitinė perdanga su dviem pusiau įbetonuotomis sijomis;
4. kiaurymėta perdangos plokštė.

Konstrukcijos 2 ir 3 lyginamos dviem variantais, kai leidžiama atsiverti plyšiams pirmoje stadijoje, ir kai plyšiai pirmoje stadijoje neleidžiami.

5.1 lentelė. Kompozitinių konstrukcijų mechaninių savybių palyginamoji lentelė

Konstr. nr.	1 stadija					2 stadija				
	M_{Rd} , kNm	V_{Rd} , kN	δ_1 , mm	M_{crc} , kNm	w_k , mm	M_{Rd} , kNm	V_{Rd} , kN	δ_2 , mm	M_{crc} , kNm	δ_Σ , mm
1	31,7 83%	30,1 64%	19,2 96%			104,5 43%	64,6 51%	4,7 21%	10,6 305%	21,9 99,5%
2	40,9 92%	103,7 26%	15,8 79%	11,4 238%	0,18	81,2 69%	103,7 39%	6,9 31%		19,1 86,7%
3	46,3 84%	240,0 11%	16,7 84%	5,8 462%	0,26	92,0 63%	240,0 17%	10,0 44%		21,5 95,2%

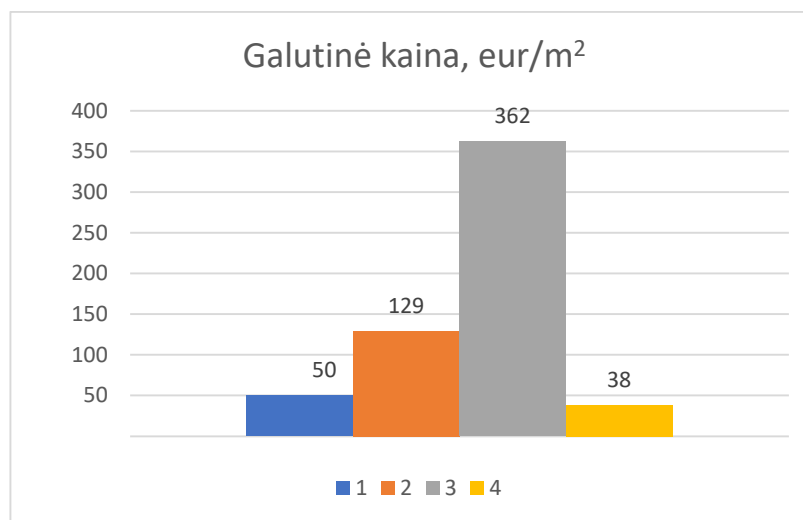
Lentelėje matyti konstrukcijų atsparumai ir įlinkiai bei konstrukcijų išnaudojimo procentai. Galime matyti, kad pirma konstrukcija tai yra kompozitinė perdanga ant profiliuoto pakloto yra išnaudojama labiausiai, jos įlinkis yra arti maksimalaus leistino. Antra ir trečia konstrukcijos turi įbetonuotą plieninę siją, todėl jų atsparumas vertikaliajam kirpimui yra didesnis. Kadangi betonas yra silpnas tempimui, konstrukcijos su įbetonuota plienine sija supleišėja jau pirmoje stadijoje, tik užpylus ant jų betoną, ir elemento standumas yra sumažėjęs. Siekiant išvengti plyšių, buvo suprojektuotos standžios konstrukcijos.

Konstr. nr.	1 stadija				2 stadija				
	M _{Rd} , kNm	V _{Rd} , kN	δ ₁ , mm	M _{crc} , kNm	M _{Rd} , kNm	V _{Rd} , kN	δ ₂ , mm	M _{crc} , kNm	w _k , mm
1	31,7 83%	30,1 64%	19,2 96%		104,5 43%	64,6 51%	4,2 19%	10,6 305%	
2	225,0 23%	287,3 13%	3,6 18%	37,8 99%	321,4 22%	287,3 18%	2,3 11%	66,32 75%	
3	1224,1 8%	2155,1 3%	2,2 11%	70,3 99%	1381,6 8%	2155,1 4%	0,5 2%	64,9 108%	0,04

Iš karto matome, kad antra ir trečia konstrukcijos yra labai mažai išnaudojamos, tokios konstrukcijos yra neefektyvios ir klojinis pirmoje stadijoje reikia ramstyti, kad neatsivertų plyšiai.

Trečia konstrukcija su nepilnai įbetonuota sija išsiskiria tuo, kad priėmus jį ir pusiau įbetonuota plieninė sija turi pilną sukibimą su betonu stipriai pleišėja, tokią konstrukciją sunku užstandinti, kadangi liktinio klojinio betono matmenys nesikeičia, keičiasi tik plieninės sijos. Norint išvengti plyšių priėmus sąlygą, kad plienas ir betonas dirba kartu jau pirmoje stadijoje, teko parinkti labai masyvias plienines sijas ir konstrukcija tapo visiškai neefektyvi.

Toliau matome galutines kainas, kai antroje ir trečioje konstrukcijoje neleidžiamas plyšys:



5.1 pav. Galutinių kainų diagrama, kai 2 ir 3 konstrukcijos yra be plyšių pirmoje stadijoje

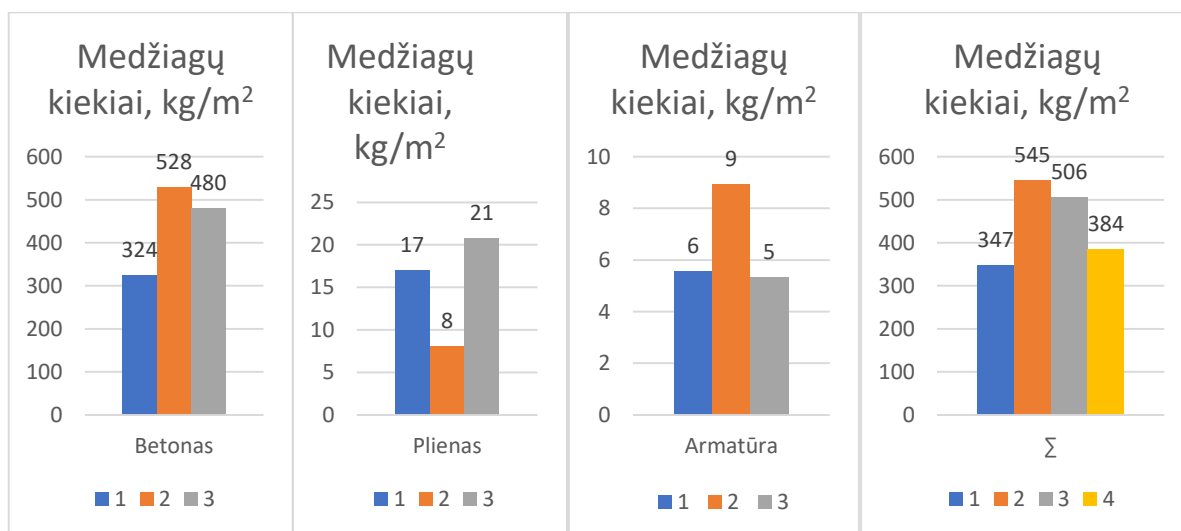
Matome, kad trečia konstrukcija su pusiau įbetonuotomis plieninėmis sijomis yra brangiausia ir visiškai neefektyvi dėl didelių plieninių sijų kainos.

5.2 Ekonominis palyginimas

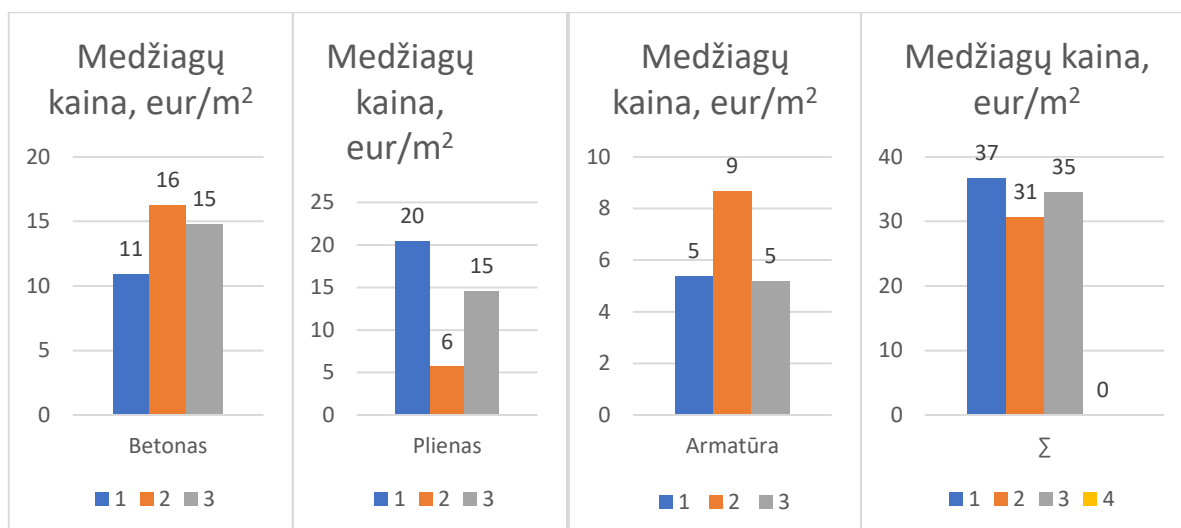
Skaičiavimai atliekami remiantis 2017-03 kainomis, sąmatos skaičiavimo programa „Sistela“.

5.3 lentelė. Konstrukcijų medžiagų kiekių ir jų kainų palyginamoji lentelė

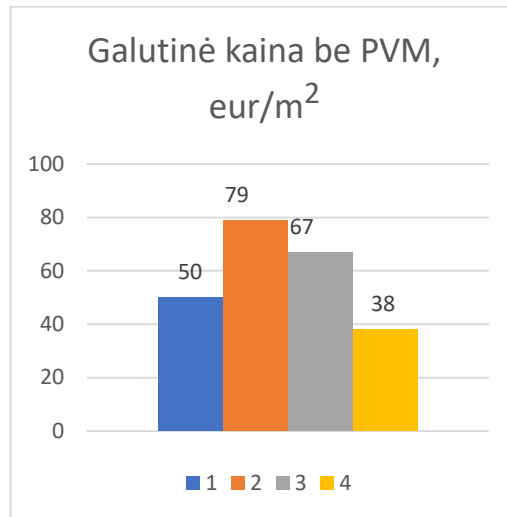
Medžiagų kiekiai					Medžiagų kainos				
Konstr. nr.	Betonas kg/m ²	Plienas kg/m ²	Armatūra kg/m ²	Σ kg/m ²	Konstr. nr.	Betonas eur/m ²	Plienas eur/m ²	Armatūra eur/m ²	Σ eur/m ²
1	324	17	6	347	1	11	20	5	37
2	552	8	18	578	2	17	6	17	40
3	506	21	15	542	3	16	15	15	45
4				384					21



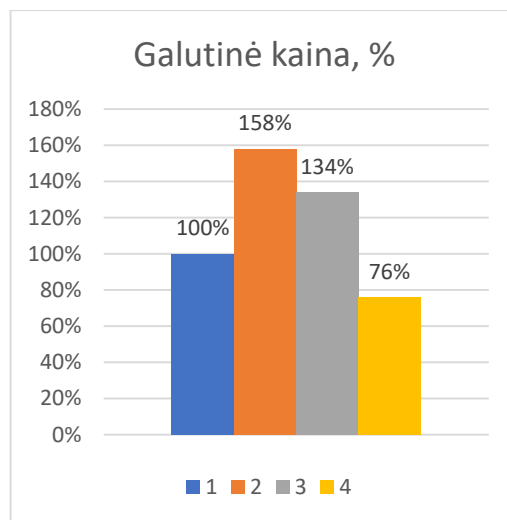
5.2 pav. Medžiagų kiekių diagramos



5.3 pav. Medžiagų kainų diagramos



5.4 pav. Galutinių kainų dieograma



5.5 pav. Galutinių kainų palyginimas su profiliuoto pakloto perdangos kaina

Iš diagramų galime matyti, kad pirmos konstrukcijos tai yra kompozitinės perdangos ant profiliuoto pakloto galutinė kaina yra mažesnė nei perdangos su įbetonuota sija, nors ir profiliuotas paklotas lyginant su plieninėmis sijomis kainuoja daugiau. Pigiausia yra kiaurymėtų plokščių perdanga, o brangiausia antra konstrukcija su pilnai įbetonuota viena sija, jos kaina didesnė dėl klojinio formos.

IŠVADOS

1. Kompozitinės perdangos su profiliuotu paklotu skaičiavimo metodikos yra pateiktos Europos standartuose, skaičiavimo pavyzdžiai pagal standartus yra pateikiami vadovėliuose. Profiliuoto pakloto mechaninės savybės yra bandymais pagrįstos ir pateikiamos gamintojo, todėl projektuojant kompozitinę perdangą ant profiliuoto pakloto didžiausią įtaka konstrukcijai turi profiliuoto pakloto mechaninės savybės. Kompozitinė perdanga su įbetonuotomis plieninėmis sijomis savo skaičiavimo metodikos neturi, skaičiavimams atlikti buvo remiamasi įvairiais šaltiniais.

2. Profiliuoto pakloto aukštis yra 225 mm, visos perdangos aukštis yra 295 mm ir ji savo atsparumą lenkimui užsitikrina dideliu aukščiu ir dideliu profiliuoto pakloto plotu. Skaičiuojant kompozitinę perdangą ant profiliuoto pakloto gauta, kad konstrukcija be laikinų atramų gali pasiekti 5500 mm tarpatramį su maksimaliu išnaudojimu. Skaičiavimai ranka sutapo su skaičiavimais programa „Comflor 9“.

3. Antra konstrukcija, turinti vieną į liktinį klojinį pilnai įbetonuotą plieninį profilį – IPE100 yra 220 mm aukščio, o trečia konstrukcija su dviem pusiau įbetonuotais plieniniais profiliais – IPE 120 yra 200 mm aukščio ir yra tokio paties aukščio kaip kiaurymėta perdangos plokštė, kuri tenkina tas pačias sąlygas. Skaičiuojant liktinius klojinius gauta, kad plieninis profilis sumažina klojinio įlinkius, tai ypatingai pasireiškia perdangoje su dviem pusiau įbetonuotomis plieninėmis sijomis. Skaičiavimais gauta, kad konstrukcijose atsiveria plyšiai. Antros konstrukcijos, su viena plienine sija atsparumas pleišėjimui yra 11,43 kNm, kai išorinių apkrovų sukeltas momentas yra 37,63 kNm, o atsivėręs plyšys yra 0,18 mm, trečioje konstrukcijoje, su dviem plieniniais profiliais atsparumas pleišėjimui yra 5,76 kNm, kai išorinių apkrovų sukeltas momentas yra 38,8 kNm o atsivėręs plyšys yra 0,26 mm.

4. Apskaičiavus konstrukcijas, matoma, kad kiaurymėta perdangos plokštė yra pigiausia – 38 eur/m², toliau profiliuoto pakloto konstrukcija 50 eur/m², antros konstrukcijos, su viena plienine sija galutinė kaina yra 79 eur/m², o trečios konstrukcijos su dviem plieninėmis sijomis kaina yra 67 eur/m². Šių konstrukcijų kaina skiriasi dėl skirtingos formos, plieno kiekio ir perdangos aukščio. Kai plyšys nėra leidžiamas, konstrukcijų kaina stipriai ir neefektyviai išauga iki 129 eur/m² ir 362 eur/m².

Apibendrinus, kompozitinė perdanga su standžia armatūra yra geras pasirinkimas esant didelėms koncentruotoms apkrovoms ir siekiant sumažinti statybos trukmę bei esant būtinybei mažinti konstrukcijos įlinkius, nedidinant perdangos aukščio. Kompozitinė perdanga su dviem įbetonuotomis sijomis yra tinkamas variantas norint greitos statybos išvengiant laikinų atramų, norint mažo perdangos aukščio ir siekiant sumažinti įlinkius.

LITERATŪRA

1. EN1994-1-1. (2004). Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. *European Committee for Standardization*, Brussels.
2. EN 1991-1-1 (2002) (English): Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-1: General actions - Densities, self-weight, imposed loads for buildings. *European Committee for Standardization*, Brussels.
3. EN 1991-1-6 (2005) (English): Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-6: General actions - Actions during execution. *European Committee for Standardization*, Brussels.
4. EN 1993-1-3 (2006) (English): Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. *European Committee for Standardization*, Brussels.
5. EN 1993-1-1 (2005) (English): Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. *European Committee for Standardization*, Brussels.
6. EN 1992-1-1 (2004) (English): Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. *European Committee for Standardization*, Brussels.
7. EN 1994-2 (2005) (English): Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 2: General rules and rules for bridges *European Committee for Standardization*, Brussels.
8. Tata Steel in Europe. Prieiga per internetą: https://www.tatasteelconstruction.com/en_GB/Products/structural-buildings-and-bridges/Composite-floor-deck/Comflor%C2%AE-100 [žiūrėta 2017-11-10].
9. STR 2.05.05:2005 „Betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas“ 2005 m. sausio 26 d. Nr. D1-44 Vilnius
10. EN 1990 (2002) (English): Eurocode - Basis of structural design. *European Committee for Standardization*, Brussels.
11. Aksa gelžbetonio konstrukcijos. Prieiga per internetą: <http://aksa.lt/filigran-plokstes/> [žiūrėta 2017-11-1].
12. EN 1990 (2002) (English): Eurocode - Basis of structural design. *European Committee for Standardization*, Brussels.
13. Steel concrete composite columns. Prieiga per internetą: <https://theconstructor.org/structural-engg/steel-concrete-composite-columns-analysis-and-design/342/> [žiūrėta 2017-11-10].
14. R. P. Johnson. Composite Structures of Steel and Concrete : Beams, Slabs, Columns, and Frames for Buildings. Third Edition. University of Warwick. 2008.

15. Bistrickaitė R., Maarčiukaitis G., Žilinskas R. Surenkamosios monolitinės gelžbetoninio perdangos su liktiniais klojiniais. Kaunas: Technologija, 2004.
16. Darko Dujmović, Boris Androić, Ivan Lukačević. Composite Structures according to Eurocode 4 Worked Examples. Kroatija 2014.
17. David collings. Steel-concrete composite buildings. Designing with Eurocodes. 2010.
18. Ioannis Vayas, Aristidis Iliopoulos. Design of Steel-Concrete Composite Bridges to Eurocodes, 2013.
19. Prof. Ján Bujňá. Metodiniai nurodymai įbetonuotoms sijoms. Encased girders. Žilina Univesitetas, Slovakija.
20. Kiaurymėtos perdangos plokštės. Prieiga per internetą: <http://www.blokeliucentras.lt> [žiūrėta 2018-01-01].

PRIEDAI