

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Būvniecības fakultāte
Būvniecības un rekonstrukcijas institūts

Leonīds PAKRASTIŅŠ

**HIERARHISKU VANŠU KONSTRUKCIJU
RACIONĀLAS FORMAS**

Būvzinātņu nozare, Būvkonstrukciju apakšnozare (P-06)

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Dr. habil. sc. ing., profesors
K.ROCĒNS

Rīga 2004

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Slodžu nesošo konstrukciju attīstībā aktuālākā problēma ir konstrukciju svara samazināšana un laidumu palielināšana, ko mūsdienās iespējams risināt izmantojot jaunākās paaudzes augstas stiprības materiālus. Risinājumu efektivitāti vislabāk raksturo attiecība starp konstrukcijas pašsvaru un lietderīgo slodzi pie fiksēta laiduma. Šo attiecību ir iespējams samazināt vairāk nekā simt reizes izmantojot konstrukciju veidošanā elementus, kuriem šķērsriezumā dominējoši darbojas stiepes spriegumi, vienlaicīgi izmantojot augstas stiprības materiālus ar daudz lielāku īpatnējo stiprību kā tradicionāliem konstrukciju materiāliem.

Stieptām konstrukcijām raksturīga nelineāra ģeometriskā pastiprināšanās (stress stiffening), kuras darbības rezultātā spriegumi elementos pieaug lēnāk nekā ārējo slodžu pieaugums. Tas nodrošina drošuma faktora palielināšanos konstrukciju robežstāvokļos. Viens no šo konstrukciju veidiem ir vanšu pārsegumi, kuru elementi ir centriski stiepti, šķērsriezuma visos punktos darbojas vienādi stiepes spriegumi, un tas paver iespējas moderno jaunākas paaudzes augstas stiprības materiālu racionālai izmantošanai.

Perspektīvākais no konstruktīvā viedokļa un izteismīgākais no arhitektoniskā aspekta ir iepriekš saspriegtais vanšu tīkls ar negatīva Gausa liekuma hiperboloīda (sedlveida) virsmu, kura ir pārsegta ar stiegrotu augstas stiprības plēvi. Konstrukciju veido no ortogonāli krustojošām nesošām ieliektām un izliektām stabilizējošām vantīm. Šai formai ir raksturīgs kinemātiskais stingums un nav vajadzības pielietot pieslodzi konstrukcijas stabilizācijai. Konstrukcijai ir statiski noturīga forma, kas novērš dinamiskas nestabilitātes parādības, tādās kā destruktīva plivināšanās (fluttering) vai izlocīšana (billoving, flapping). Šīs formas priekšrocība ir arī tā, ka to var veidot uz taisnstūra atbalsta kontūra, un, lai sasniegtu kopēju konstrukciju stingumu, ir nepieciešami relatīvi nelieli ieliekuma rādiusi, kas ļauj samazināt materiāla patēriņu gan pašam vanšu tīklam, kā arī atbalsta konstrukcijai. Deformācijas lielumi ārējo slodžu iedarbības rezultātā ir relatīvi mazāki, salīdzinot ar citām vanšu konstrukcijām.

No materiāla patēriņa viedokļa (lielas stiprības materiāla nestspējas pilnvērtīgas izmantošanas) racionālākie ir sedlveida vanšu pārsegumi ar lokanu atbalsta kontūru. Virknē darbos ir noteikti racionālie ģeometriskie raksturlielumi sedlveida vanšu pārsegumiem ar lokano atbalsta kontūru ar izmēriem plānā no 10 - 50 m. Pie lielākiem laidumiem, no būves funkcionāla viedokļa attiecība starp pārsegto tilpumu un laukumu bieži ir nepieņemama.

Izmantojot sedlveida pārsegumus ar lokano atbalsta kontūru par tipveida elementiem lielu laukumu pārsegšanai, un iekarot to stūrus augstākas pakāpes vanšu konstrukcijā, iegūst hierarhisku, savstarpēji pakārtotu vanšu pārsegumu, kura laidums var pat pārsniegt 0,5 kilometrus. Šai konstrukcijai piemīt visas priekšrocības, kas ir atsevišķam sedlveida vanšu elementam, taču tai ir labāka pārsegta tilpuma un laukuma attiecība. Šīs lielās hierarhiskās struktūras moduļus var kombinēt kopā, lai veidotu lielākas pārsegta platības.

Hierarhiskus vanšu pārsegumus lietderīgi izmantot liela laiduma būvēs, piemēram, sporta laukumu, koncertzāļu, autostāvvietu pārsegumos. Šīs konstrukcijas var izmantot arī kā pilnīgi vai daļēji demontējamus pagaidu pārsegumus.

Liellaiduma hierarhisku pārsegumu pielietošana ļaus radīt labvēlīgus apstākļus dabas resursu racionālai izmantošanai, veidojot lielas segtas platības lauksaimniecībā vai mākslīgas klimatiskās zonas vietās ar nelabvēlīgiem laika apstākļiem.

Darba mērķis

Izstrādāt racionālu hierarhisku vanšu konstrukciju un noteikt tās ģeometriskos parametrus, izejot no minimāla materiāla patēriņa uz pārsegtās platības vienību.

Darba mērķa sasniegšanai ir nepieciešams:

- izstrādāt hierarhisko vanšu konstrukciju veidošanas pamatprincipus un rekomendācijas;
- izvēlēties pamatelementa racionālus parametrus;
- izanalizēt hierarhiskas konstrukcijas 3-4 variantus un izvēlēties vienu no aplūkotiem variantiem kā racionālāko no materiāla patēriņa viedokļa;
- izstrādāt aprēķinu metodiku vanšu materiāla patēriņam atkarībā no hierarhiskā vanšu pārseguma ģeometriskiem parametriem un mezglu pārvietojumiem;
- veikt hierarhiskās vanšu konstrukciju darba analīzi gadījumā, kad darbojas dažāda lieluma vēja un gadījuma sniega slodzes.

Darba zinātniskā novitāte

Izstrādāta jauna un racionāla no materiāla patēriņa viedokļa hierarhiska vanšu pārseguma konstrukcija, kas ļauj 1,5-2 reizes samazināt materiāla patēriņu, salīdzinot ar citām liellaiduma konstrukcijām ar laidumu līdz 220 m. pie vienādām lietderīgām slodzēm.

Izveidota pamatelementa konstrukcijas balstu pieļaujamo pārvietojumu noteikšanas metodika.

Pierādīts, ka hierarhisko vanšu konstrukciju pamatelementus nav iespējams racionāli izveidot bez kompozītvanšu izmantošanas ar palielinātiem robeždeformāciju un stinguma raksturotājiem.

Izstrādāta vanšu materiāla patēriņa aprēķinu metodika atkarībā no hierarhiskā vanšu pārseguma galveniem ģeometriskiem parametriem un mezglu pārvietojumiem, kas pamatojas uz apakšmodeļu un iterācijas metodes kombināciju.

Noteikta sakarība starp galveniem hierarhisko vanšu konstrukciju ģeometriskiem parametriem un vanšu svaru uz pārsegtās platības vienību un dotas hierarhisko konstrukciju veidošanas rekomendācijas.

Darba praktiskā vērtība

Rādīta iespēja izveidot hierarhiskas vanšu konstrukcijas lielu laidumu pārseģšanai, kas raksturojas ar mazāku materiālu patēriņu nekā citās pārseguma konstrukcijās.

Noteikti galvenie racionālie no materiāla patēriņa viedokļa hierarhiskas konstrukcijas ģeometriskie raksturlielumi.

Dotas rekomendācijas hierarhisko vanšu konstrukciju veidošanai.

Aizstāvēšanai tiek izvirzīts

- izstrādātās hierarhisko vanšu konstrukciju veidošanas rekomendācijas un pamatprincipi;
- aprēķinu metodikas mezglu pārvietojumu un vanšu materiāla patēriņa atkarības noteikšanai no hierarhiskā vanšu pārseguma ģeometriskiem parametriem un pieliktās slodzes;
- sakarības starp galveniem hierarhisko vanšu konstrukciju ģeometriskiem parametriem un vanšu svaru uz pārsegtās platības vienību;
- noteiktās racionālās galveno ģeometrisko raksturlielumu vērtības izstrādātajai konstrukcijai;

Darba sastāvs un apjoms

Promocijas darbs sastāv no ievada, 6 nodaļām, slēdziena un bibliogrāfijas. Darba apjoms ir 134 lappuses, 72 zīmējumi, 10 tabulas un literatūras saraksts, kas satur 143 nosaukumus.

Darba aprobācija un publikācijas

Promocijas darba rezultāti ziņoti un apspriesti starptautiskajās konferencēs:

- SDSMS-96 "Strength, Durability and Stability of Materials and Structures", (Kaunas, Lithuania, 1996).
- SF-99 "Modern Building Materials, Structures and Techniques", (Vilnius, Lithuania, 1999).
- 7th Int. Conf. Modern Building Materials, Structures and Techniques, (Vilnius, Lithuania, 2001).
- II Pasaules latviešu zinātnieku kongresā, (Rīga, Latvija 2001).
- MCM-2002, 12th Int. Conf. Mechanics of Composite Materials, (Riga, Latvia, 2002).
- 8th Int. Conf. "Modern Building Materials, Structures and Techniques", (Vilnius, Lithuania, 2004).

Darba oriģinalitāti apliecina arī Latvijas Republikas patents Nr.12191. K.Rocēns, G.Vērdiņš, D.Serdjuks, L.Pakrastiņš. "Kompozītpārseguma konstrukcija", 20.03.1999.

Galvenie darba rezultāti izklāstīti 11 publikācijās.

DARBA SATURS

Darba sākumā pamatota tēmas aktualitāte, raksturots pētījuma objekts, formulēti darba mērķis, zinātniskā novitāte un praktiskā nozīme.

Pirmajā nodaļā dota vanšu konstrukciju patreizējā stāvokļa analīze, klasifikācija, pielietojamo materiālu un aprēķina metodiku apskats, to galvenās priekšrocības un trūkumi.

Pasaules būvniecības praksē pirmā negatīvā Gausa liekuma tīklveida vanšu konstrukcija bija uzbūvēta pēc V.G.Šuhova izstāžu paviljona projekta

1896.gadā Nižnij Novgoroda. Atzīmēts vācu arhitekta Otto Freja lielais ieguldījums 3-dimensionālo stiepto konstrukciju attīstībā, viņa doktora disertācija bija pirmais vispusīgais darbs šajā jomā, un līdz pagājušā gadsimta 80.gadiem viņš bija praktiski vienīgais, kurš nodarbojās ar vanšu pārsegumu izpēti un praktisko realizāciju. Ar Otto Freja tiešo līdzdalību bija uzceltas pirmās liellaiduma vanšu konstrukcijas pārklātas ar audumu, tādas kā Vācu paviljons Expo 67' izstādē Monreālā un olimpiskā stadiona pārsegums Minhenē 1972.gadā. Stiepto konstrukciju pētījumi atspoguļoti D.Geigera, LG.Dmitrieva, N.M.Kirsanova, N.S.Moskaleva, V.Kulbaha, K.Oigera un citos darbos.

Pārsegumi klasificēti atkarībā no formas plānā (konstruktīvās formas), konstrukciju formas stabilizācijas principa (pārseguma stabilizācijas paņēmiena), vanšu materiāla veida, balsta kontūras veida, balstu atrašanās vietas (kontūras iekšpusē vai ārpusē).

Detalizēti aplūkoti dažādi vanšu veidi, un parādītas to galvenās fizikāli-mehāniskās īpašības, īpaši atzīmējot, ka sevišķi perspektīva nozīme ir tādu kompozītu kā oglekļaplasta (CFC) un šķidro kristālu polimēra (LCP) materiālu pielietošana vanšu pārsegumu veidošanai.

Secināts, ka pareizai ārējai pielietošanai ir izmantojami divi stiegrotas plēves pārklājuma veidi: Polivinilhlorīda (PVC) pārklāts poliestēra audums un teflona (PTFE) pārklāts stikla šķiedras audums. Tieša stiegrotas plēves izvēle ir atkarīga no visas konstrukcijas pielietošanas nozīmes, jo stiprības īpašības ir aptuveni vienādas. Stiegrotas plēves uz poliestēra bāzes pielieto, galvenokārt, pagaidu rakstura daudzkārt saliekamām būvēm ar mazāku ilgmūžību labas salokamības dēļ. Savukārt stiegrotas plēves uz stikla šķiedru bāzes izdevīgāk pielietot atbildīgām pastāvīgām būvēm ar kalpošanas termiņu lielāku par 15 gadiem, labākas ilgmūžības dēļ. Šis materiāls ir relatīvi trausls un izjaucamo konstrukciju veidošana ir problemātiska.

Atzīmēts, ka tīklveida vanšu konstrukcijām ir raksturīgi lieli mezglu pārvietojumi pie samērā mazām elementu deformācijām. Konstrukcijas attīstības sākumā aprēķinus veica izmantojot modificētu membrānas čaulu teoriju, sastādot diferenciālo vienādojumu sistēmas, kuras ir sarežģīti atrisināt slēgtā formā. Visbiežāk šos vienādojumus risina ar skaitliskām metodēm, tādām kā galīgās diferences metode. Secināts, ka čaulu teorijai ir neapmierinoša precizitāte vanšu tīkliem ar rupju acu izmēru un tā nevar būt piemērota sarežģītām pārsegumu formām.

Attīstoties skaitļošanas tehnikai tika izveidotas citas skaitliskās metodes, piemēram, metode uz potenciālās enerģijas minimuma bāzes, dinamiskās relaksācijas tehnika, kā arī visvairāk izplatītā galīgo elementu metode (FEM). Šī metode sākumā tika izveidota, lai analizētu konstrukcijas ar mazām deformācijām, bet pēc tam tika modificēta par iteratīvo nelineāra stinguma metodi. Šādu nelineāru problēmu risināšanai visvairāk attīstīta ir Ņūtona-Rapsona iterācijas metode, kuras princips konstrukciju aprēķinos izpaužas ārējās slodzes pielikšanā ar nelielu soļu pieaugumu.

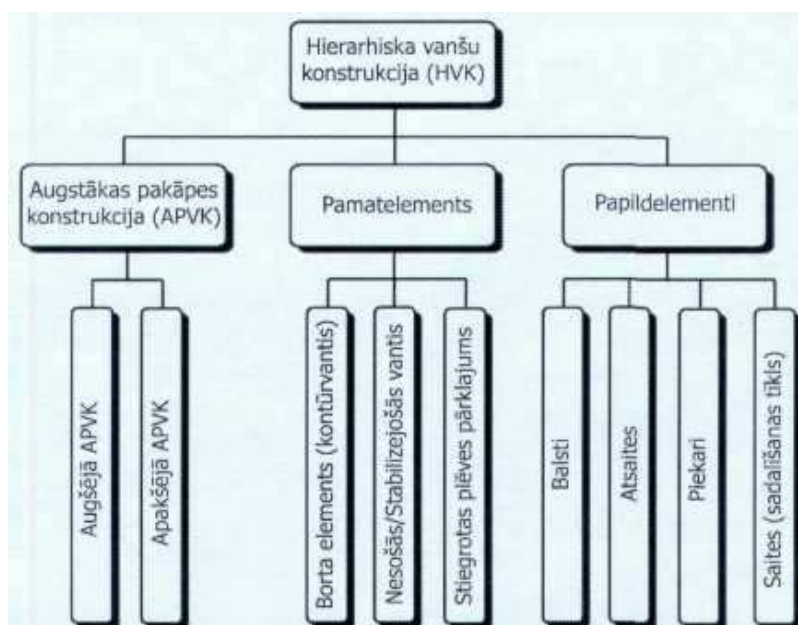
Īpaši atzīmēts, ka šī Ņūtona-Rapsona tehnikas kombinācija ar galīgo elementu metodi nodrošina labu efektivitāti un precizitāti un ir pielietojama vairākiem vanšu konstrukciju.

Parādīts, ka vanšu konstrukciju galvenie trūkumi ir: palielināti mezglu pārvietojumi, atsevišķos gadījumos relatīvi slikta pretkorozijas izturība, balstu konstrukciju nepieciešamība balstbīdes uzņemšanai. Apkopotas galvenās sedlveida vanšu konstrukciju priekšrocības - jaunas arhitektoniskās izteiksmības

iespējas, iespējamā gaismas caurlaidība, mazs konstrukciju svars, samazināta deformējamība attiecībā pret citām vanšu konstrukcijām, augstas stiprības materiālu pielietojuma efektivitāte vanšu trošu izgatavošanai, relatīvi vienkārša montāža, celtniecības ilguma samazināšana, transportēšanas priekšrocības (ruļļos), laba seismiskā izturība, lētākas uguns aizsardzības metodes ar uzputojošiem polimēriem, zema uzturēšanas maksa.

Otrajā nodaļā noformulēts hierarhisko vanšu konstrukciju veidošanas pamatprincips, un apkopota galveno sastāvdaļu struktūra. Nodaļā parādīts, ka hierarhisko konstrukciju veidošanai maksimāli iespējamo laidumu pārsegšanai bez starpbalstiem, racionālākais ir modulis ar 4x4 pamatelementiem. Secināts, ka vieglākais projektēšanas darbs, vienkāršota darba analīze, iespējama sērijveida rūpnieciskā ražošana, viegla transportēšana un uzstādīšana. Tie ir galvenie faktori, kas apliecina hierarhisko vanšu konstrukciju priekšrocības kā regulāras struktūras un rezultātā izpaužas kopīgas konstrukciju cenas samazināšanā salīdzinoši ar citām liellaiduma konstrukcijām.

Pamatojoties uz promocijas darba autora, K.Rocēna un D.Serdjuka iepriekš veiktajiem pētījumiem, kur ir noteikti racionālie ģeometriskie raksturlielumi atsevišķi stāvošiem sedlveida vanšu pārsegumiem ar lokano atbalsta kontūru un izmēriem plānā no 10 - 50 m, parādīts, ka pie lielākiem laidumiem attiecība starp pārsegto tilpumu un laukumu ir nepieņemama, jo izraisa nelietderīgu apsildāmā apjoma palielināšanu. Šo problēmu var atrisināt izmantojot sedlveida pārsegumus ar lokano atbalsta kontūru par tipveida elementiem un iekarinot to stūrus augstākas pakāpes vanšu konstrukcijā (APVK), iegūstot hierarhisku, savstarpēji pakārtotu vanšu liellaiduma pārseguma konstrukciju (HVK), kuras galveno sastāvdaļu detalizēta struktūra atspoguļota 1.attēlā.



1.att. Hierarhisku vanšu pārsegumu iedalījums.

Sedlveida vanšu pārsegumus var veidot uz dažāda plāna formām, bet hierarhisko konstrukciju formēšanai racionālāk izmantot tikai taisnstūra plāna

variantu. Šim variantam ir mazāks atšķirīgo elementu skaits, kas atvieglo ražošanas un montāžas procesus, kā arī nav liegta iespēja paplašināt konstrukciju nepieciešamā virzienā, atšķirībā no rombveida sedlveida pārsegumiem, kas veido zvaigžņu formas atsevišķi stāvošus koncentriskus pārsegumus.

Pamatojoties uz augšminēto hierarhiskas konstrukciju veidošanas principu, tās var veidot sākot no vismaz 4 pamatelementiem (malu attiecība 2x2 elementi). Bet šo variantu nevar uzskatīt kā pilnīgi atbilstošu hierarhijas principam, jo neviens pamatelements pilnīgi nav balstīts uz augstākas pakāpes vanšu konstrukciju. Konstrukcija ar īsteno hierarhijas pazīmi ir konstrukcija, kura sastāv vismaz no 9 (3x3) pamatelementiem, kur vismaz viens vidējais pamatelements pilnīgi iekārts augstākas pakāpes konstrukcijā, kas sadalās divās daļās: augšējā augstākas pakāpes vanšu konstrukcijā, kurā iekārti augšējie pamatelementu balstmezgli, un apakšējā augstākas pakāpes vanšu konstrukcijā pie kuras attiecīgi iekārti apakšējie pamatelementu balstmezgli.

Turpinot palielināt hierarhisko konstrukciju laidumu, maksimāli iespējamo laidumu pārsegšanai bez starpbalstiem, izveido hierarhisku konstrukciju ar pamatelementu skaitu 16 (4x4), kurai ir iespējamās daudz dažādas augstākas pakāpes konstrukciju konfigurācijas. Tālāka pamatelementu skaita palielināšana līdz 5x5 un vairāk, ir neracionāla, jo ar lielāku pamatelementu skaitu ir nepieciešams šos elementus balstīt augstākas pakāpes vanšu konstrukcijā vairāk nekā divos punktos, kas padara problemātisku šo mezglu sākotnējā stāvokļa realizāciju montāžas laikā un pārvietošanu ierobežošanu ekspluatācijas periodā, kas ir nepieciešams, lai pamatelementā pie neizdevīgākās slodžu kombinācijas spriegumi stabilizējošās vantis nesamazinātos līdz nullei, un pats elements nezaudētu stingumu.

Noskaidrots, ka hierarhiskai vanšu konstrukcijai, kā regulārai struktūrai piemīt sekojošas priekšrocības:

- konstrukciju izgatavošanai ir nepieciešams salīdzinoši neliels sastāvdaļu komplekts, kas ļauj samazināt konstrukciju cenu, rūpnieciski ražojot identiskus elementus lielās sērijās;
- stiegrotai plēvei var izveidot neliela daudzuma standarta griešanas paraugus;
- neliela elementu dažādība ļauj precīzāk izpildīt montāžas darbus;
- pēc vajadzības konstrukciju var viegli papildināt nepieciešamā virzienā ar tādiem pašiem elementiem (piemēram konstrukcija var sekot arheoloģisku darbu platības palielināšanai);
- regulāri atkārtotojās konstrukcijas shēma ļauj samazināt skaitliskā modeļa izmērus, izmantojot modelēšanai tikai dažas reprezentatīvākās daļas, ievērojot šīs daļas ietekmi uz pārejām konstrukciju sastāvdaļām (apakšreģionu metode);
- atkārtotamība ļauj ģenerēt lielu arhitektūras formu dažādību;
- vieglāka bojātas daļas aizvietošana.

Minētās priekšrocības nodrošina hierarhisko vanšu konstrukciju izmaksas konkurentspēju ar citām liellaiduma konstrukcijām.

Trešajā nodaļā ir detalizēti aplūkoti dažādi hierarhisko konstrukciju veidi atkarībā no formas plānā, pamatelementu un atbalsta konstrukciju skaita. Atspoguļoti dažādu konstruktīvu risinājumu trūkumi un priekšrocības. Analizētas augstākās pakāpes vanšu konstrukcijas sastāvdaļu - galvenās nesošās vantis, apakšējā savilču tīkla un pamatelementu piekaru darbības īpatnības atkarībā no laiduma,

mezglu skaita, vanšu garuma un pamatelementu balstmezglu iespējamiem pārvietojumiem. Aplūkota viņu topoloģija un varianti.

Secināts, ka neskatoties uz mazāku elementu skaitu, shēmai ar slīpiem piekariem ir acīmredzami trūkumi: pārāk garas kolonnas, kas rada lielus zemākā līmeņa tipveida elementu augšējo stūru vertikālos pārvietojumus kā arī lielus horizontālus spēkus tajos, atkarībā no leņķa starp piekariem un vertikālo asi, kas var prasīt tipveida elementa pastiprināšanu. Kā racionāla, pieņemta pārseguma shēma ar vertikāliem piekariem.

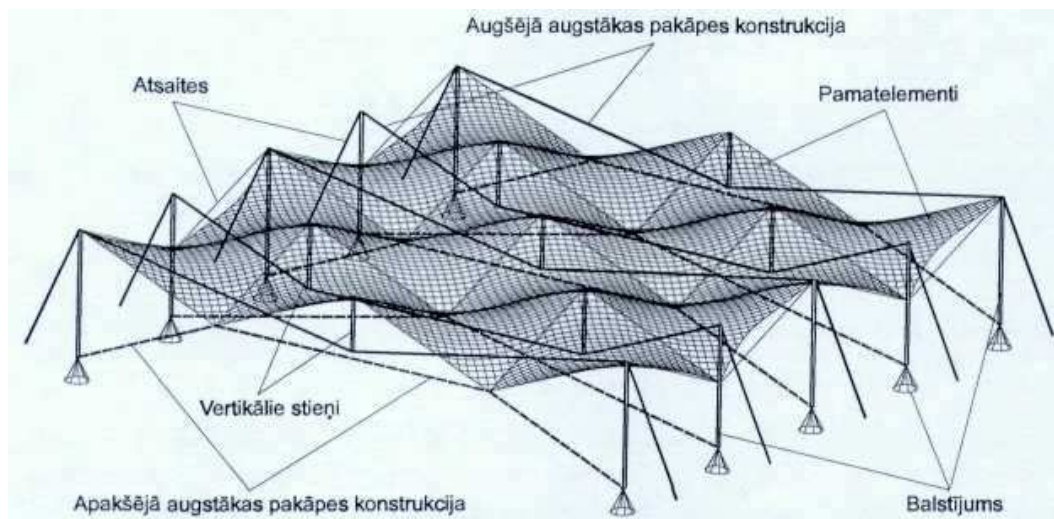
Pierādīts, ka plakanais apakšējais savilču tīkls raksturojas ar neracionālu materiāla izmantošanu, tāpēc apakšējo augstākās pakāpes konstrukciju nepieciešams veidot ar ieliekumu uz augšu.

Secināts, ka ir racionāli veidot konstrukcijas uz kvadrātiskā plāna ar pamatelementu skaitu 4x4, jo tas ļauj veidot mazāk noslogotu augšējo augstākās pakāpes vanšu konstrukciju ar minimālu elementu skaitu, samazinātu vanšu garumu un nesošo statu augstumu, salīdzinot ar taisnstūra variantu pie vienādiem pamatelementu izmēriem.

Lai neizslēgtu iespēju paplašināt konstrukciju moduļa garenvirzienā, tālākai izstrādāšanai tika pieņemts augstākās pakāpes vanšu konstrukciju šķērsvirziena variants un ir pielietota attiecīga statu izvietojanas shēma. Izveidots hierarhiskas struktūras modulis, kas sastāv no 4x4 pamatelementiem, kuru ir iespējams kombinēt kopā, lai veidotu lielākas pārsegtās platības.

Konstrukciju kopējā augstuma samazināšanai, augšējā augstākās pakāpes vanšu konstrukcijas daļa tiek nolaiستا zem pamatelementu līmeņa, vienlaicīgi paceļot tā stūrus ar vertikāliem režģotiem stieņiem, kas ir piestiprināti pie izveidotās konstrukcijas un atsevišķos gadījumos var tikt izmantoti kā spriegotāji.

Izveidotais hierarhiskas struktūras moduļa variants attēlots 2.zīmējumā.



2.att. Hierarhiska vanšu pārseguma moduļa vienkāršots variants

*Atsaites moduļa garenvirzienā un konstruktīvās saites starp pamatelementu stūriem nosacīti nav parādītas

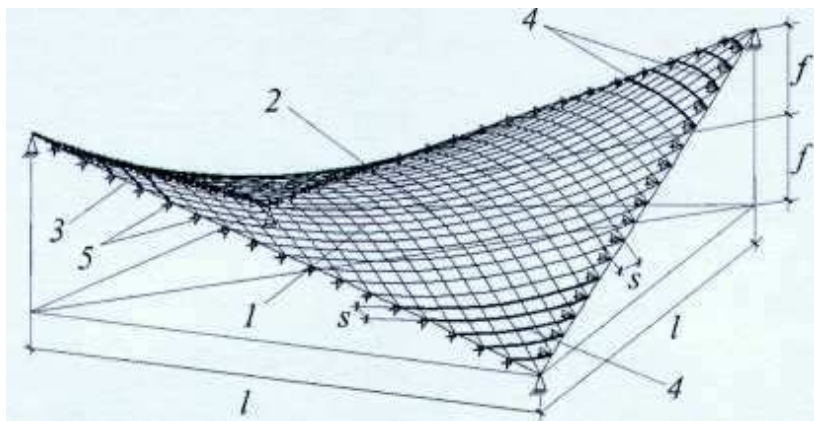
Izstrādātais racionālais paplašināmais hierarhiskas konstrukcijas modulis raksturojas ar minimālu elementu skaitu, samazinātu vanšu garumu un nesošo statu augstumu.

Ceturtajā nodaļā izstrādāta pamatelementa konstrukcijas stūru pieļaujamo pārvietojumu noteikšanas metodika un aprēķināta sedlveida pamatelementa konstrukcija. Pamatojoties uz aprēķina rezultātiem, noteiktas vēlamās vanšu materiālu un pārklājuma īpašības un novērtēti sedlveida pamatelementa stūru pieļaujamie robežpārvietojumi.

Detalizētai konstrukciju darba izpētei pieņemti sekojoši pamatelementa izmēri: 35 x 35m, 45 x 45m, 55 x 55 m.

Par pamatelementa konstrukciju pieņemts iepriekš sasprīgtais vanšu tīkls ar negatīvā Gausa liekuma sedlveida hiperboloīda virsmu, pārsegtu ar stiegrotu plēvi. Pamatelements veidots no ortogonāli krustojošām nesošām ieliektām un stabilizējošām izliektām vantīm. Lai pārsegums nezaudētu stingumu, ir jānodrošina, lai pie visneizdevīgākās slodžu kombinācijas, spriegumi stabilizējošās vantīs nesamazinātos līdz nullei, jo vietās, kur vantis nav uzspriegtas var attīstīties destruktīvas plivināšanās parādības un veidoties bojājumi pārsegumā.

Kvadrātveida plānā pamatelementa sedlveida konstrukcija pieņemta ar vienādu ieliekumu kā nesošām, tā arī stabilizējošām vantīm, jo atkarībā no vertikālo slodžu virziena vanšu funkcijas mainās vietām. Stabilizējošās vantis paliek par nesošām un otrādi. Skaitliskajam eksperimentam ieliekuma lielumus pieņem vienādu ar 1/20; 1/10; 1/5; 1/2,5 daļu no laiduma saskaņā ar literatūrā esošajām rekomendācijām. Pamatelementa aprēķina shēma parādīta 3.attēlā.



3.att. Pamatelementa aprēķina shēma

1, 2 - nesošās/stabilizējošās vantis; 3 - kontūrvantis; 4 - LCP Vectran* kompozītvantis; 5- simetrijas robežnosacījumi; l - laidums; f - nesošo un stabilizējošo vanšu sākotnējais ieliekums; S - nesošo un stabilizējošo vanšu solis. *Stiegrotas plēves pārklājums nosacīti nav parādīts

Pamatelementa borta elementu hierarhisko vanšu konstrukciju vidusdaļā izveido kā taisnu vanti, simetriski noslogotu ar horizontāliem spēkiem, kuri veidojas no blakus esošo pamatelementu nesošajām vai stabilizējošajām vantīm. Vienmērīgi izkliedētas slodzes gadījumā šie spēki savstarpēji kompensējas, kas ļauj samazināt materiāla patēriņu uz borta elementa rēķina. Augstāk minētā shēma, pie pamatelementa aprēķina, ļauj pielietot simetrijas robežnosacījumus un tuvina to darbību kā elementam ar stingo atbalsta kontūru, kas ievērojami samazina pamatelementa deformējamību. Malējiem pamatelementiem borta elementu veido kā uzstieptu izliektu vanti, noslogotu ar lielu nekompensētu horizontālo slodzi no vanšu tīkla. Šo elementu ieliekumu izvēlamies vienādu ar 1/15 daļu no laiduma, pamatojoties uz to, ka borta elementu var uzskatīt kā brīvi.

iekārtu vanti, noslogotu ar izkliedēto slodzi. Šajā gadījumā taisnas formas stingra borta elementa izveidošana ar garumu $\geq 35\text{m}$ ir neracionāla lielo piepūļu dēļ. Kopējās pamatelementa deformējamības samazināšanai, balstoties uz mūsu iepriekšējiem pētījumiem, borta elementu izveido kā vanšu kopni. Borta elementiem uzspriegšanas lielumu pieņem $\frac{1}{2}$ no aprēķina pretestības, lai izvairītos no borta elementa iepriekšēja uzsprieguma zudumiem atsevišķo slodžu kombināciju gadījumos.

Izejot no konstruktīviem nosacījumiem, vanšu tīkla solis tiek pieņemts $1,77\text{ m}$, lai tajā neveidotos ūdens maisi no lietus, tāpēc, ka stiegrota plēve vai cita veida pārklājums vanšu tīklu konstrukcijās galvenokārt nodrošina ārējo slodžu pārnesanu uz vanšu tīklu.

Pamatelementa vanšu tīkla sākotnējai dimensionēšanai pieņemts iepriekšējais uzspriegums vienāda līmenī visām tīkla vantīm saskaņā ar literatūrā esošām rekomendācijām, kas sastāda $22,5\%$ no vanšu robežstiprības stiepē ($\frac{1}{2}$ no aprēķina pretestības). Tas ir nepieciešams, lai nodrošinātu pretēja virziena vertikālo slodžu uzņemšanu, jo atkarībā no slodžu virziena, nesošo un stabilizējošo vanšu funkcijas var mainīties vietām. Lai novērstu tērauda trosēm raksturīgo spriegumu relaksācijas parādību, sekojam, lai spriegumi no pastāvīgās slodzes un iepriekšēja uzsprieguma nepārsniegtu 45% no vanšu robežstiprības stiepē.

Apvienojot pamatelementus hierarhiskā konstrukcijā ārējo slodžu iedarbībā, kopīgs borta elements diviem blakus esošiem pamatelementiem paliek taisns plānā, bet vertikālā projekcijā pieņem S-veida līklīnijas veidu, kas izraisa vanšu nokares pamatelementa stūros pie mazām slodzēm. Lai kompensētu iepriekšējā uzsprieguma zudumu, pamatelementa stūrus nepieciešams izveidot no kompozītvantīm ar palielinātām robeždeformācijas vērtībām, kas sastāda 7% no kopējā vanšu garuma. Tādas ir vantis no nesēn izstrādātā "šķidro kristālu polimēra" (LCP) Vectran* kurš ir izveidots uz poliestēra molekulu bāzes ar regulāri orientētu struktūru šķiedru garenvirzienā. Šķiedrām no šī materiāla piemīt minimāla šļūdes tieksme.

Pamatelements, strādājot kā hierarhiskas konstrukcijas sastāvdaļa disponēts ar viņa izraisīto reakcijas spēku slogoto augstākas pakāpes konstrukciju ietekmi, kas izpaužas pamatelementu augšējo un apakšējo balstmezglu pārvietošanu savstarpēji pretēja virziena, t.i. sākotnēja ieliekuma samazināšanos. Tas savukārt iespaido pieguļošo vanšu uzsprieguma samazināšanos ārējo slodžu iedarbības procesā.

Lai novērtētu, cik lieli pieļaujami pamatelementu balstmezglu pārvietojumi, bez vanšu nokarēm, (kas vienlaicīgi nozīmē cik stiprai jābūt augstākas pakāpes vanšu konstrukcijai, lai nodrošinātu balstmezglu pārvietojumus ne vairāk par šīm robežvērtībām), tika veikts skaitliskais eksperiments augstākminētiem pamatelementu variantiem pie trim slodžu līmeņiem: 1 - konstrukciju pašsvars un gadījuma sniega slodze ($0,48\text{ kN/m}^2$), 2 - konstrukciju pašsvars un vēja nosūce saskaņā ar O.Freja rekomendācijām, kad slodžu vērtības, proporcionālas faktisko aerodinamisko koeficientu sadalījumam, aizvieto ar vienmērīgi izkliedēto slodzi ($0,76\text{ kN/m}^2$), 3 - konstrukciju pašsvars un vēja nosūce pie $2x$ palielināta vēja ātruma, saskaņā ar literatūrā esošajām rekomendācijām ($1,60\text{ kN/m}^2$), kas pēc sava lieluma pārsniedz Latvijā spēkā esošās, būvnormās dotās, sniega slodžu vērtības. Nepieciešams atzīmēt, ka reālais aerodinamisko koeficientu sadalījums piedāvātai konstrukcijai nav zināms, jo ir nepieciešami maketa pētījumi aerodinamiskajā caurulē, vai vēja plūsmas iedarbības modelēšana ar galīgo elementu metodi, izmantojot plūsmas mehānikas matemātisko aparātu.

Aprēķins izpildīts ar galīgo elementu metodes programmu "ANSYS 7.0 University", izmantojot vanšu modelēšanai universālo telpiska stieņa galīgo elementu LINK10, kuram katrā mezglā ir trīs brīvības pakāpes un īpaša bilineāra stinguma matrica, kas atkarīga no deformācijas virziena, un kura ievērtē, ka elements strādā tikai uz stiepi. Vanšu elementa nokares gadījumā, lai novērstu konstrukcijas mezglu neierobežotu pārvietošanos, elementam var būt mazs stingums ārpus darba virziena, kura lielums ir $AE \cdot 10^{-6} / L$ (A - elementa šķērsgriezuma laukums; E - elastības modulis un L - elementa garums). Ir paredzēta pašsvara un temperatūras gradienta ievērošana, kā arī sākotnējās deformācijas $\epsilon^{in} = (L-L_0)/L$ ieviešana, kur L_0 - elementa garums neuzspriegtā stāvoklī. Elementa garums un šķērsgriezuma laukums nedrīkst būt vienāds ar nulli.

Elementa statusu nosaka pirmajā sloģošanas posmā, izejot no sākotnējās deformācijas ϵ^{in} (iepriekšēja sasprieguma) zīmes. Ja šis lielums ir mazāks par nulli, tad elementa stingumu pieņem vienādu ar nulli. Ja elements maina savu statusu iterācijas soļu laikā, elementa stingumu iekļauj nākamajā solī. Lai paaugstinātu iekārto vanšu konstrukciju risinājuma skaitlisko stabilitāti, iepriekšsaspriegšanas stabilizācijas efektu ievēro ar papildu stinguma matricas ģenerāciju elementam, kuru sauc par "spriegumu stinguma matricu" (stress stiffness matrix):

$$[S_t] = \frac{F}{L} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & 0 & 0 & -C_2 & 0 \\ 0 & 0 & C_2 & 0 & 0 & -C_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -C_2 & 0 & 0 & C_2 & 0 \\ 0 & 0 & -C_2 & 0 & 0 & C_2 \end{bmatrix}$$

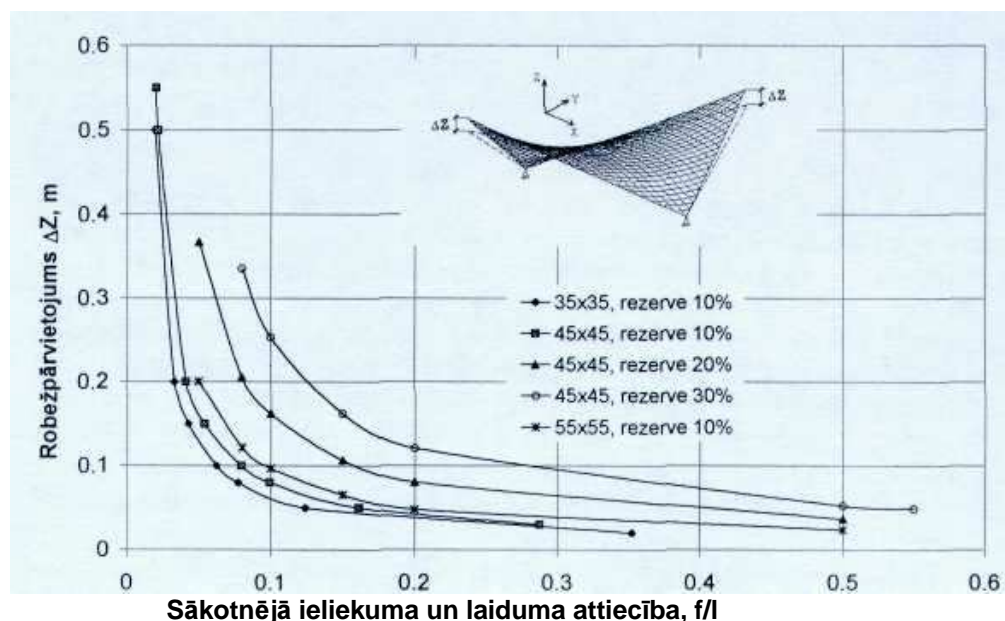
kur F - garens spēks elementā; $C_2 = 1,0/0,0$ (stiepe/spiede), gadījumā, kad elementam nav stinguma ārpus darba virziena; $C_2 = 1,0/(AE/F \cdot 10^6)$ (stiepe/spiede), gadījumā, kad elementam ir neliels stingums ārpus darba virziena.

Lai aprēķinātu vispārējo stingumu, šo matricu pievieno regulārajai stinguma matricai. Tā kā spriegumu stinguma matrica tiek izskaitļota uz pirmās iterācijas spriegumstāvokļa bāzes, tad risinājuma iegūšanai vajadzīgas kā minimums divas iterācijas. Lai uzlabotu vienādojumu sistēmas konvergenci, programma dod iespēju pielietot lineārā meklējuma paņēmieni un sloģojuma soļu automatisku maiņu, kā arī konverģences kritēriju maiņu.

Eksperiments tika veikts ar meklēšanas paņēmieni, par atskaites punktu pieņemot stāvokli, kad uz konstrukciju iedarbojas slodzes no pašsvara un iepriekšējā uzsprieguma. Sakarā ar to, ka uz pamatelementu var iedarboties vienāda lieluma vēja spiediens kā ar pozitīvo, tā arī ar negatīvo zīmi, kas pēc lieluma ir vienāds ar pozitīvo slodžu vērtību no sniega slodzes Latvijas apstākļos, konstrukcijas darbs ir simetrisks horizontālai plaknei, aprēķins tika veikts divos etapos. Pirmajā nosakot pamatelementa augšējo balstsmezglu robežpārvietojumus uz leju (slodžu pielikšanas virzienā), un otrajā attiecīgi

zemāko balstmezglu robežpārvietojumus uz augšu pretēji slodžu pielikšanas virzienam.

Eksperimenta rezultāti rāda, ka pamatelementa balstmezglu pārvietojumu robežvērtībās galvenokārt atkarīgas no šī elementa sākotnējā ieliekuma. Pamatelementa aprēķina shēma pirmajam etapam un likumsakarība starp šo elementu balstmezglu pārvietojumu robežvērtībām un pamatelementa sākotnējo ieliekumu parādīta 4. zīmējumā.



4.att. Pamatelementa balstmezglu pārvietojumu robežvērtības pirmajām etapam atkarībā no pamatelementa sākotnējā ieliekuma

Lai nodrošinātu vanšu nokares neveidošanos, vanšu iepriekšējā uzspriegumā ir nepieciešams izveidot rezervi procentuāli 10-40% robežās no kopējā sākotnējā uzspriegumā (vanšu šķērsriezumu palielināšana 1,25-5,0 reizes relatīvi pamatelementa stāvoklim bez mezglu pārvietojumiem), lielāka un mazāka rezerve nav racionāla, jo tas izraisa strauju materiāla patēriņu palielināšanu, attiecīgi pamatelementam lielākas rezerves gadījumā un augstākās pakāpes vanšu konstrukcijai mazākas rezerves gadījumā.

Analizējot pamatelementa un augstākās pakāpes vanšu konstrukcijas savstarpēju mijiedarbību pierādīts, ka racionālais sākotnējā ieliekuma apgabals pamatelementam atrodas no 0,05 līdz 0,2 f/l, kas ir ārpus racionālā ieliekuma vērtības 0,3 f/l pamatelementam bez mezglu pārvietojumiem.

Piektajā nodaļā izstrādāta detalizēta metodika vanšu konstrukcijas pārvietojumu un materiāla patēriņa noteikšanai uz pārsegtās platības vienību, kas pamatojas uz apakšmodeļu un iterācijas metodes kombināciju.

Stieptas konstrukcijas vispārīgi un it īpaši vanšu tīkla konstrukcijas raksturojas ar nelineāro statisko darbu, kurš raksturojas ar mainīgu stingumu, t.i. pārvietojumi nav proporcionāli slodžu pieaugumam.

Vanšu konstrukciju nelineārais statiskais darbs atkarīgs no vairākiem iemesliem, tādiem kā: elementa statusa izmaiņas (konstrukcijas nelineāra

uzvedība ir atkarīga no zināmiem apstākļiem, piemēram: vants var būt uzspriegta vai vaļīga), ģeometriskas un materiāla nelinearitātēm.

Aplūkotām konstrukcijām raksturīgi divi ģeometriskās nelinearitātes veidi: a) lieli pārvietojumi - konstrukcijas darbs ar lieliem mezglu pārvietojumiem pie relatīvi mazām elementu deformācijām; b) spriegumu pastiprināšanās (stress stiffening) - konstrukcijas stinguma $[K]$ palielināšana pieaugot arējai slodzei (ģeometrijas adaptācija pieliktai slodzei).

Hierarhisko vanšu konstrukciju aprēķina algoritmā, komplicētības samazināšanai, iekļauta tikai ģeometriski nelineāra konstrukcijas darbība, lai ievērtētu visvairāk iespaidojošus uzvedības faktorus. Vienlaicīgi veicot pasākumus, lai pārējie nelinearitātes faktori nedotu vērā ņemamu iespaidu uz aprēķina rezultātiem: katrā sloģošanas posmā, lai pārsegums nezaudētu stingumu, ir jānodrošina, ka pie neizdevīgākās slodžu kombinācijas vantis nemaina statusu (neveidojas vanšu nokares), t.i. spriegumi stabilizējošās vantīs nesamazinātos līdz nullei, jo šajās vietās var veidoties bojājumi pārklājumā vai arī flatera destruktīvs plivināšanās parādība. Lai samazinātu tērauda trosēm spriegumu relaksācijas iespaidu, pieņemts, ka spriegumi no pastāvīgās slodzes un uzsprieguma nedrīkst pārsniegt 45% no vanšu robežstiprības stiepē. Pielietojot vantis no kompozītmateriāliem, tās ir izvēlētas ar minimālo šļūdes ietekmi.

Lai samazinātu kopējo aprēķina apjomu un komplicētību, kā arī izvairītos no uzdevuma konverģences problēmām, regulāri atkārtotojās sistēmas modelēšanai izmanto tā saucamo apakšmodeļu vai apakšreģionu (substructure or subregion) metodi, kura konstrukciju sadala līmeņos, un kā pirmo etapu aprēķina pamatelementa sastāvdaļu nepieciešamos šķērsgriezumus un balstmezglu reakcijas spēkus - iegūstot informāciju (robežnosacījumus) augstākās pakāpes vanšu konstrukcijas aprēķinam nākamajā etapā. Šo aprēķinu rezultātā iegūst datus nākošajai iterācijai - sedlveida pamatelementa aprēķinam ar jaunām robežnosacījumu vērtībām.

Aprēķina pirmajā etapā pamatelementa vanšu sākotnējai dimensionēšanai pieņemts iepriekšējais uzspriegums vienādā līmenī visām tīkla vantīm, kas sastāda 40-10% no materiāla aprēķina stiprības, ievērojot rezervi attiecīgi 10-40% robežās uz balstmezglu pārvietošanu. Sākumā tika veikts aprēķins pamatelementa vanšu šķērsgriezumu atrašanai ar pilnu slodzi ar iterācijas paņēmieni katram pamatelementa variantam un katram slodžu līmenim, ievērojot nosacījumu, lai nevienā vanšu grupā neveidotos spriegumi, kas pārsniedz attiecīgā materiāla stiprības īpašības. Ar nākamo soli tika veikts aprēķins ar atrastiem vanšu šķērsgriezumiem un slodzi no pašsvara un iepriekšējā uzsprieguma. Veidojot konstrukciju sākotnējo (atskaites) deformēto stāvokli atbilstoši reāliem būvniecības apstākļiem, konstrukcijai pēc pašsvara un iepriekšēja uzsprieguma pielikšanas, tika veikts mezglu koordināšu precizējums atbilstoši konstrukcijas deformētajam stāvoklim.

Nākamajā etapā pieliekot pilnu slodzi pamatelementam ar koriģētu ģeometriju, iegūstam balstmezglu reakcijas spēkus, t.i. robežnosacījumus augstākās pakāpes vanšu konstrukcijas aprēķinam. Tālāk tika veikts augstākās pakāpes konstrukcijas aprēķins ar meklējuma paņēmieni, lai iegūtu augstākās pakāpes vanšu šķērsgriezumus pie nosacījuma, ka slodžu pielikšanas vietās (pamatelementu balstmezglos) augstākās pakāpes konstrukcijas pārvietojumi nepārsniegs iepriekšējā nodaļā noteiktās robežpārvietojumu vērtības.

Piedāvātā metodika raksturojas ar sekojošām priekšrocībām:

- Jauj aprēķināt lielas un komplicētas konstrukcijas, izmantojot viegli pieejamus skaitļošanas resursus, jo atsevišķo hierarhisko konstrukciju sastāvdaļu sistēmas matricas ir mazas, kas ir tiešais subreģionu rezultāts;
- samazina datortehnikas skaitļošanas laiku jo, lielākā daļa no konstrukcijas pamatelementiem ir identiski un to aprēķinu nepieciešams veikt tikai vienu reizi;
- uzlabo aprēķina konverģenci;
- samazina laiku, kas nepieciešams konstrukciju pārveidošanas un tālākās atkārtotas analīzes gadījumā, jo atsevišķas konstrukciju daļas var palikt nemainīgas;
- nodrošina sistēmas pieeju komplicētiem aprēķiniem: konstrukciju daļas var tikt analizētas neatkarīgi, kas pozitīvi ietekmē turpmāko konstrukciju projektēšanu, jo labāk saskaņojas ar reālo projektēšanas tehnoloģiju;
- var izveidot bibliotēkas no sadalītiem subreģionu elementiem, kas ļauj viņus izmantot citās projektēšanas grupās, kuras nodarbojas ar līdzīgu konstrukciju aprēķiniem;
- var izveidot pilnu konstrukcijas modeli, izmantojot daudzpakāpju apakšreģionu metodi, ar iespēju iegūt pārvietojumus un spriegumus jebkurā konstrukciju sastāvdaļā, lai cik maza tā arī nebūtu. Piemēram savienošanas mezglu projektēšanai, lietūs ūdens maisu veidošanas vai arī atsevišķo daļu dinamiskās uzvedības modelēšanai.

Sestajā nodaļā tika veikta hierarhisko vanšu konstrukciju darba analīze, gadījumā, kad darbojas dažāda lieluma vēja un gadījuma sniega slodze. Iegūta likumsakarība starp galveniem hierarhisko vanšu konstrukciju ģeometriskiem parametriem un vanšu svaru uz pārsegtās platības vienību un izstrādātas racionālo hierarhisko konstrukciju veidošanas rekomendācijas.

Liellaiduma pārseguma konstrukcijas un tās uzturēšanas komponentes ir nepieciešams izstrādāt, lai tās droši izturētu visas iedarbojošās slodzes konstrukciju montāžas un ekspluatācijās laikā, darbojoties adekvāti paredzētiem mērķiem visā projektētajā to izmantošanas laikā. Sakarā ar to, ka pasaulē pagaidām neeksistē inženieru standarti, kur ir noteiktas prasības un projektēšanas principi vanšu tīklu konstrukcijām, tās veido pamatojoties, galvenokārt, uz pieredzes un labāko praktisko piemēru sintēzes. Pēdēja laikā, lai noteiktu slodzes lielumus konstrukcijām ar sarežģītu formu, ir attīstījušās speciālas modelēšanas metodes, bet tās prasa dārgu aparatūru, programmatūru un jaudīgus datorus.

Apkopojot pasaules statistiku par liellaiduma konstrukciju bojājumiem un sabrukšanas gadījumiem, kā arī to apkalpošanas jautājumiem, var iegūt informāciju konstrukciju avārijas mehānismu izpratnei un identificēt nenoteiktības, kas ietekmē konstrukciju drošuma kritērijus. Konstrukcijas sagrūšana ir saistīta ne tikai ar slodžu sadalījuma un stiprības prognozēto varbūtību, bet iesaista arī citus faktorus, tādus kā cilvēka faktoru, nolaidību, zemu kvalifikāciju vai dažu slodžu neievērošanu. Projektēšanas nenoteiktības ir arī saistītas ar konstrukcijas modeļa adekvātumu, kas reprezentē attiecību starp faktisko un prognozēto konstrukcijas uzvedību.

Potenciālie faktori, kuri var ietekmēt konstrukciju virzību uz negadījumiem ir sekojoši: jauni vai netradicionāli materiāli, jaunas vai netradicionālas būvniecības metodes, jauni vai netradicionāli konstrukciju veidi, nepietiekama pieredze projektēšanas un būvniecības darba grupu organizēšanā, pētniecības un

attīstības fons, finansiālie apstākļi, industriālais un politiskais klimats. Tāpēc ļoti svarīgi veikt pētījums, kuru rezultātā var paaugstināt zināšanu līmeni par nesošo konstrukciju darbību.

Visi šie faktori tiešā veidā attiecas uz liellaiduma vanšu konstrukcijām, un ņemot vērā konstrukciju sabrukšanas statistikas rezultātus, izriet, ka lielākā daļa no avāriju iemesliem ir neadekvāta sloģojuma ievērtēšana. Tāpēc darbā tika detalizēti analizētas slodzes iedarbības nozīmīguma secība. Atzīmēts, ka saskaņā ar pasaulē veiktajiem pētījumiem, pārklājuma lokālas dinamiskas nestabilitātes parādības, tādas kā flatteris un izlocīšana (billowing) neietekmē konstrukcijas darbu kopumā, un Latvijas apstākļos no visām dinamisko slodžu iedarbībām, nozīmīga ir tikai vēja iedarbības zemās frekvences, kuras saskaņā ar Eiropas būvnormām ievērtē ar slodžu drošuma koeficientiem, vai palielinātu vēja vidējo ātrumu.

Lai noteiktu hierarhisku vanšu konstrukciju galveno ģeometrisko raksturlielumu racionālas vērtības, tika veikta hierarhisko vanšu konstrukciju darba analīze ar skaitliskā eksperimenta palīdzību, izmantojot FEM programmas nodrošinājumu "ANSYS University" katra eksperimenta punkta vērtības iegūšanai, un programmu "STATISTICA" kombinētā Latīņu hiperkuba un D-optimālā eksperimentālā plāna sastādīšanai, rezultātu analīzei un polinoma koeficientu noteikšanai.

Skaitliskajam eksperimentam pieņemti sekojoši mainīgo faktoru lielumi - pamatelementa izmēri: 35 x 35m, 45 x 45m, 55 x 55 m, ieliekuma lielumi pamatelementam: 1/10, 1/5, 1/2,5 daļas no laiduma, iepriekšēja uzsprieguma rezerve: 10%, 20%, 30%, 40% no sākotnējā uzsprieguma, ieliekuma lielumi augstākas pakāpes vanšu konstrukcijai: 1/10, 1/5, 1/2,5 daļas no laiduma. Trīs līmeņa slodzēm: I - konstrukciju pašsvars un gadījuma sniega slodze (0,48 kN/m²), II - konstrukciju pašsvars un vēja nosūces vērtības aizvietotas ar vienmērīgi izkliedēto slodzi (0,76 kN/m²), III - konstrukciju pašsvars un vēja nosūce ar 2x palielinātu vēja ātrumu (1,60 kN/m²).

Sakarība starp pārseguma galveniem raksturlielumiem un materiāla patēriņu, kas nepieciešams vienas laukuma vienības pārsegšanai iegūta kā otrās pakāpes polinoms:

$$C = b_0 + b_1 l + b_2 p + b_3 \tilde{f} + b_4 r + b_5 \tilde{F} + b_{12} l p + b_{13} l \tilde{f} + b_{14} l r + b_{15} l \tilde{F} + b_{23} p \tilde{f} + b_{24} p r + b_{25} p \tilde{F} + b_{34} \tilde{f} r + b_{35} \tilde{f} \tilde{F} + b_{45} r \tilde{F} + b_{11} l^2 + b_{22} p^2 + b_{33} \tilde{f}^2 + b_{44} r^2 + b_{55} \tilde{F}^2$$

kur:

C - materiāla patēriņš, kas nepieciešams vienas laukuma vienības pārsegšanai, kg/m²;

l - pamatelementa laidums, m;

p - aprēķina slodze, kN/m²;

\tilde{f} - pamatelementa ieliekuma attiecība, f/l;

r - iepriekšēja uzsprieguma rezerve, %;

\tilde{F} - ieliekuma attiecība augstākas pakāpes vanšu konstrukcijai, F/L.

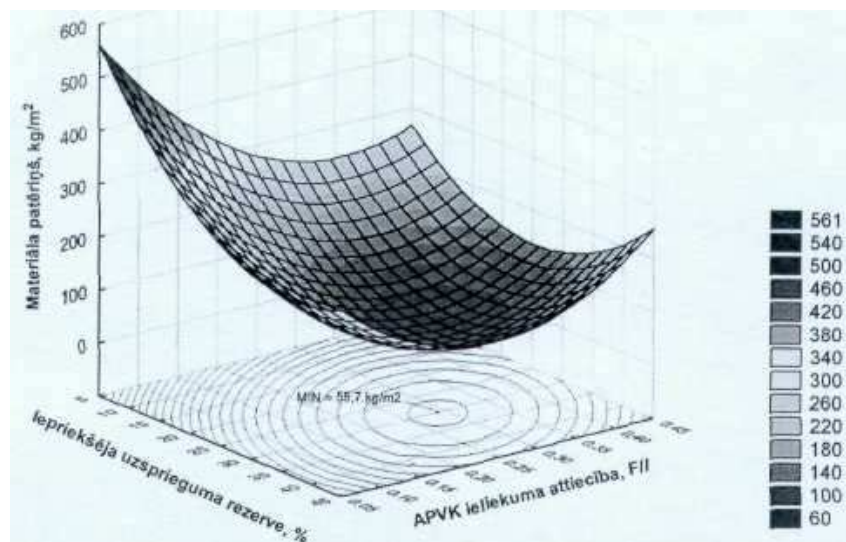
Polinoma koeficienti noteikti ar mazāko kvadrātu metodes palīdzību:

1.Tabula. Polinoma koeficienti

b_0	650.6	b_{13}	2.15	b_{35}	-393.3
b_1	-21.2	b_{14}	-0.23	b_{45}	19.74
b_2	-80.9	b_{15}	-17.3	b_{11}	0.40
b_3	-130.9	b_{23}	151.0	b_{22}	48.8
b_4	-9.88	b_{24}	-2.58	b_{33}	741.9
b_5	-1445.0	b_{25}	-236.1	b_{44}	0.31
b_{12}	4.85	b_{34}	-9.12	b_{55}	3377.8

Veiktajam skaitliskajam eksperimentam ir tāda īpatnība, ka rezultātu pamatā nav fiziskais eksperiments, un tie ir noteikti bez statistiskām kļūdām. Rezultātu atkārtojamība ir 100%, tās nozīmē ka eksperimenta rezultātā iegūto lielumu vērtībām neeksistē statistiskā dispersija, un nav jēgas veikt papildus aprēķinus, lai atkārtotu novērojumus. Standartnovirze starp skaitliskā eksperimenta rezultātā iegūto lielumu vērtībām un vērtībām, kuras noteiktas ar otras pakāpes polinoma matemātisko modeli, darbā pētītajā intervālā nepārsniedz 4,78%. Tas liecina, kā matemātiskais modelis adekvāti apraksta skaitliskā eksperimenta iegūtos rezultātus.

Analīze rāda, ka vislielākā ietekme uz materiālu patēriņu ir sekojošiem diviem parametriem: augstākās pakāpes konstrukcijas sākotnējam ieliekumam un pamatelementa iepriekšējā uzsprieguma rezervei. Šī atkarība gadījumam ar pamatelementa laidumu 45x45m (kopējais laidums 180m) un ārējo slodzi 0,48kN/m² grafiskā veidā ir parādīta 5.attēlā. Racionālais augstākās pakāpes konstrukcijas sākotnējais ieliekums sastāda 0,288 daļas no laiduma un pamatelementa iepriekšējā uzsprieguma rezerves 30,2%.

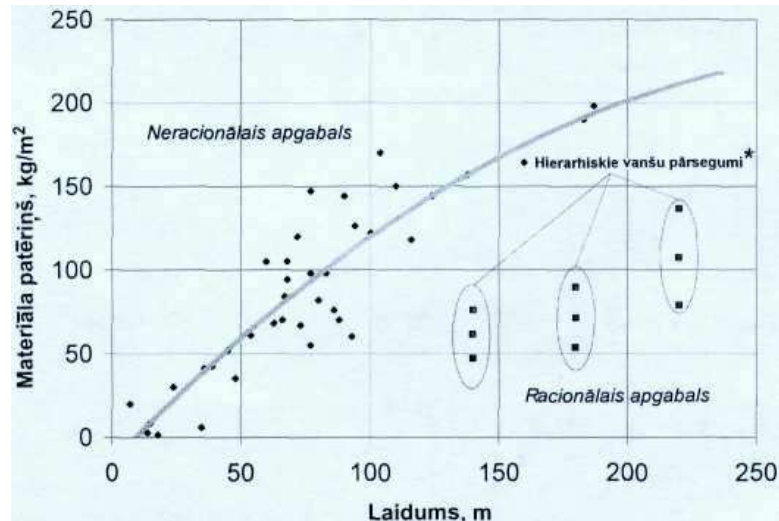


5.att. Hierarhiskā vanšu pārseguma ar pamatelementa laidumu 45x45m materiāla patēriņa piemērs ar ārējo slodzi 0,48 kN/m² atkarībā no un augstākās pakāpes konstrukcijas sākotnējā ieliekuma un pamatelementa iepriekšējā uzsprieguma rezerves.

Analizējot konstrukciju darbu ir izstrādātas sekojošas racionālas hierarhiskas konstrukcijas veidošanas rekomendācijas:

- racionāli izmantot hierarhiskās vanšu konstrukcijas moduli ar izmēru 4x4 pamatelementi, jo lielāks modulis raksturojas ar neracionālu materiāla izmantošanu augstākās pakāpes vanšu konstrukcijai;
- daļu no augšējās augstākas pakāpes vanšu konstrukcijas elementiem lietderīgi izvietot zem pamatelementu līmeņa, vienlaicīgi paceļot pamatelementu stūrus ar vertikāliem režģotiem stieņiem, kas balstās uz šīm vantīm, lai samazinātu kopējo konstrukciju augstumu;
- nepieciešams veidot apakšējo augstākās pakāpes konstrukciju ar ieliekumu uz augšu tāpēc, ka plakana apakšējais savilču tīkls raksturojas ar neracionālu materiāla izmantošanu;
- pārseguma shēmu jāveido ar vertikāliem piekariem, jo slīpo piekaru pielietošana var prasīt tipveida elementu pastiprināšanu;
- ieteicams augstākas pakāpes vanšu konstrukcijas šķērsvirziena variants, lai neizslēgtu iespēju paplašināt konstrukciju moduļa garenvirzienā;
- nepieciešams paredzēt paliekošā uzsprieguma rezervi 10-40% robežās no iepriekšējā saspietuma sākotnējā lieluma, lai nodrošinātu vanšu nokares neveidošanos pamatelementā;
- nepieciešams izveidot konstruktīvas saites starp pamatelementu stūriem, koncentrēto un vēja horizontālo slodžu izraisīto piepūli ietekmes sadalīšanai starp pamatelementiem.

Informācija par uzbūvētu liellaiduma konstrukciju materiāla reducētu uz tēraudu patēriņu atkarībā no laiduma ir apkopota 6. attēlā.



6.att Liellaiduma konstrukciju materiāla patēriņš atkarība no laiduma

"Hierarhiskām vanšu pārseguma konstrukcijām materiāla patēriņš parādīts trīs slodžu līmeņiem

Salīdzinot darbā izstrādātā pārseguma konstrukciju ar citām jau uzbūvētām liellaiduma konstrukcijām, redzams, ka hierarhiskas vanšu konstrukcijas materiāla patēriņš atrodas racionālajā apgabalā.

SECINĀJUMI

Veikta hierarhisko vanšu konstrukciju darba analīze gadījumos, kad darbojas dažāda lieluma vēja un sniega slodzes, un iegūta sakarība starp galveniem hierarhisko vanšu konstrukciju ģeometriskiem parametriem, lietderīgo slodzi un vanšu svaru uz pārsegtās platības vienību, kā arī izstrādātas rekomendācijas racionālo hierarhisko konstrukciju veidošanai.

Promocijas darbā:

- izstrādāta jauna un racionāla no materiāla patēriņa viedokļa hierarhiska vanšu pārseguma konstrukcija, kas ļauj 1,5-2 reizes samazināt materiāla patēriņu, salīdzinot ar citām liellaiduma konstrukcijām;
- izstrādāta un nodimensionēta sedlveida pamatelementa konstrukcija un veikta tās sastāvdaļu materiālu izvēle. Izveidota pamatelementa balstmezglu pieļaujamo pārvietojumu noteikšanas metodika;
- parādīts, ka hierarhisko vanšu konstrukciju pamatelementus sarežģīti izveidot, nelievojot vantis no kompozītmateriāliem ar robeždeformācijām līdz 4%;
- pierādīts, ka pamatelementa un augstākas pakāpes vanšu konstrukcijas savstarpējās mijiedarbības rezultātā, racionālais sākotnējā ieliekuma apgabals pamatelementam atrodas no 0,05 līdz 0,2 f/l, kas ir ārpus racionālā ieliekuma vērtības 0,3 f/l atsevišķi stāvošam pamatelementam, kurš nav hierarhiskas konstrukcijas sastāvdaļa;
- izstrādāta aprēķinu metodika vanšu materiāla patēriņa uz pārsegtās platības vienību noteikšanai atkarībā no hierarhiskā vanšu pārseguma galvenajiem ģeometriskajiem parametriem un mezglu pārvietojumiem, kas pamatojas uz apakšmodeļu un lterācijas metodes kombināciju. Augstākminētai konstrukcijai noteiktas racionālas galveno ģeometrisko raksturlielumu vērtības;
- noteikta sakarība starp hierarhisko vanšu konstrukciju galveniem ģeometriskiem parametriem - pamatelementa laidumu, iepriekšēja uzsprieguma rezervi, ieliekuma lielumiem pamatelementam un augstākas pakāpes vanšu konstrukcijai, slodžu lielumam un vanšu svaru uz pārsegtās platības vienību, kā arī dotas hierarhisko konstrukciju veidošanas rekomendācijas;
- secināts, ka palielinot materiāla patēriņu pamatelementiem (iepriekšējā uzsprieguma rezerve uz balstmezglu pieļaujamo pārvietojumu rēķina), var ievērojami samazināt kopējo hierarhiskās konstrukcijas materiāla patēriņu uz augstākas pakāpes konstrukcijās izmantotā materiāla rēķina.
- parādīts, ka ar pieejamo galīgo elementu metodes programmatūras nodrošinājumu var aprēķināt piepūles, pārvietojumus un materiāla patēriņu sarežģītiem savstarpēji pakārtotiem hierarhiskiem vanšu pārsegumiem un noteikt atsevišķu konstrukciju elementu pārvietojumu ietekmi uz pārējiem konstrukcijas elementiem.
- parādīts, ka salīdzinot ar analogām būvēm, piedāvātajai konstrukcijai ir gandrīz divas reizes izdevīgāka attiecība starp konstrukcijas pašsvaru un lietderīgo slodzi pie dotā laiduma.

PUBLIKĀCIJU SARAKSTS

1. Rocēns K., Pakrastiņš L., Brauns J. Warping of Composite Materials. *Proc. SDSMS-96, Strengt'h, Durability and Stability of Materials and Structures*, Kaunas, Lithuania, 1996, September 18-20. PP.248-252.
2. Rocēns K., Vērđiņš G., Serdjuks D., un Pakrastiņš L. Kompozītpārseguma konstrukcija. - *Latvijas Republikas Patents Nr. 12191*. Publicēts 20.03.1999.
3. Serdjuks D., Rocēns K., Pakrastiņš L. Rational Geometrical Characters of Saddle Shape Cable Roof Supported By Tensioned Čabies. *Proc. SF-99, Modern Building Materials, Structures and Techniques*, Vilnius, Lithuania, 1999, May 19-21. Vol II, PP.122 -127.
4. Сердюк Д., Роценс К., Пакрастиньш Л. Использование композитных материалов в седловидном вантовом покрытии. *Mechanics of Composite Materials*. - Riga, 2000, - Vol.36, No.5. - PP.637 - 644.
5. Serdjuks D., Rocens K., Pakrastinsh L. Composite Structure of Saddle Shape Cable Roof. *Rīgas Tehniskās universitātes Zinātniskie raksti*. - Riga, 2000, - 2.Sērija Arhitektūra un būvzinātne, 1. Sējums. - PP.101 -106.
6. Pakrastiņš L., Serdjuks D., Rocēns K. Some Structural Possibilities to Decrease the Compliance of Saddle Shape Cable Structure, *Proc. of the 7th Int.Conf. Modern Building Materials, Structures and Techniques, Vilnius, Lithuania*, 2001, May 16-18. PP. 24 - 25.
7. Pakrastinsh L., Rocens K. Hierarhiskie vanšu pārsegumi. *Rīgas Tehniskās universitātes Zinātniskie raksti*. - Riga, 2001, - 2.Sērija Arhitektūra un būvzinātne, 2. Sējums. - PP.130 -135.
8. Brauns J., Rocēns K., Pakrastiņš L. Kokskaidu plātņu ilglaicīga šļūde. *Rīgas Tehniskās universitātes Zinātniskie raksti*. - Riga, 2002, - 2.Sērija Arhitektūra un būvzinātne, 3. Sējums. - PP. 113 -122.
9. Сердюк Д., Роценс К., Пакрастиньш Л. Потери предварительного напряжения в стабилизирующих вантах композитного седловидного вантового покрытия. *Mechanics of Composite Materials*. - Riga, 2003, - Vol.39, No.4.-PP.513-522.
- 10.Pakrastinsh L., Rocens K. Evaluation of Cable Material Consumption of Ties Depending on the Nodal Displacements of Hierarchic Roof. *Rīgas Tehniskās universitātes Zinātniskie raksti*. - Riga, 2003, - 2.Sērija Arhitektūra un būvzinātne, 4. Sējums. - PP.182 -187.
- 11.Pakrastiņš L., Rocēns K. Calculation Principles of Cable Material Consumption Depending on the Nodal Displacements and Geometrical Parameters of Hierarchic Roof, *Proc. of the 8th Int. Conf. Modern Building Materials, Structures and Techniques*, Vilnius, Lithuania, 2004, May 19-21. - PP. 271-218.