

KARĪNA
BUKA-VAIVADE

DMITRIJS
SERDJUKS

LĪGA
GAILE



2023

Koka grīdu konstrukciju
vibrāciju pārbaudes
saskaņā ar otrās
paudzes Eirokodeksu



Būvniecības inženierzinātņu fakultāte
Būvkonstrukciju inženierzinātņu
institūts

Karīna Buka-Vaivade, Dmitrijs Serdjuks, Līga Gaile

Koka grīdu konstrukciju vibrāciju pārbaudes saskaņā ar otrās paaudzes Eirokodeksu

METODISKIE NORĀDĪJUMI

RTU Izdevniecība
Rīga 2023

Karīna Buka-Vaivade, Dmitrijs Serdjuks, Līga Gaile. **Koka grīdu konstrukciju vibrāciju pārbaudes saskaņā ar otrās paaudzes Eirokodeksu.** Rīga: RTU Izdevniecība, 2023. 22 lpp.

Koka grīdu projektēšanā lielākoties noteicošais ir lietojamības robežstāvoklis. Lietojamības robežstāvokļa pārbaude iekļauj ne tikai momentāno un galīgo maksimālo pārvietojumu noteikšanu, bet arī vibrāciju pārbaudes. Projektējot koka grīdas, ir jānodrošina, lai konstrukcijas ekspluatācijā paredzamas iedarbes neradītu vibrācijas, kas var pasliktināt konstrukcijas darbību vai radīt diskomfortu cilvēkiem. Nereti tieši vibrāciju pārbaudes koka grīdām ir noteicošas, īpaši vieglu koka konstrukciju gadījumā. Šajos metodiskajos norādījumos ir apkopota informācija par koka grīdu vibrāciju pārbaudēm saskaņā ar otrās paaudzes Eirokodeksu. Metodiskie norādījumi kalpos kā vērtīgs palīglīdzeklis RTU būvniecības specialitāšu studentiem praktiskajos darbos mācību priekšmetā “Koka konstrukcijas”, kā arī studiju darbu un projektu darbu izstrādē.

Šis darbs ir izstrādāts ar Latvijas Zinātnes padomes projekta Nr. lzp-2020/1-0240 “Koaksiālo paātrinājumu korelācijas metode 6-D telpā būvkonstrukciju savienojumu kvalitātes novērtēšanai” un Rīgas Tehniskās universitātes Doktorantūras grantu programmas (DOK.BIF/21) atbalstu.

Literārā redaktore Inga Gulbe

Datorsalikums Baiba Puriņa

Vāka dizains Paula Lore

ISBN 978-9934-22-894-0 (print)

ISBN 978-9934-22-893-3 (pdf)

© Karīna Buka-Vaivade, Dmitrijs Serdjuks,
Līga Gaile, 2023

© Rīgas Tehniskā universitāte, 2023

SATURS

levads	4
1. Koka grīdu vibrāciju pārbaudes	6
1.1. Vibrāciju kritēriju robežvērtību noteikšana.....	6
1.2. Koka grīdu raksturlielumi	7
1.2.1. Grīdas rimšanas koeficients	7
1.2.2. Grīdas efektīvais lieces stingums	8
1.3. Vibrāciju pārbaudes algoritms	11
2. Skaitliskie piemēri	12
2.1. Grīdas vibrāciju pārbaudes ar $f_1 > 8$ Hz	12
2.2. Grīdas vibrāciju pārbaudes ar $4,5 \text{ Hz} \leq f_1 < 8 \text{ Hz}$	16
Literatūras saraksts	22

levads

Viena no lielākajām Latvijas dabas resursu bagātībām ir mežs, kas ir Latvijas pamata ekosistēma. 2018. gadā meži Latvijā aizņēma 52 % no valsts sauszemes teritorijas. Mežs veidojas dabiski, aizņemot arī tās teritorijas, ko ilgāku laiku neskar cilvēka darbība, tāpēc laika gaitā mežu platība palielinās. Mežu daudzums Latvijā, kā arī fakts, ka mežs ir atjaunojams dabas resurss, rada ievērojamu priekšrocību, lai būvniecībā izvēlētos kokmateriālus.

Dažādām konstrukcijām ir jāpārbauda gan lietojamības, gan nestspējas robežstāvokļi [1]. Lietojamības robežstāvoklis parasti ir noteicošs vidēja un liela laiduma konstrukcijām, kas pakļautas liecei un/vai smagiem mainīgiem apkārtējās vides apstākļiem, kā, piemēram, tiltu vai jumta konstrukcijām. Koka grīdu konstrukciju lietojamības robežstāvoklis iekļauj ne tikai momentāno un galīgo maksimālo pārvietojumu noteikšanu, bet arī vibrāciju pārbaudes. Viegļajām koka grīdu konstrukcijām tieši vibrāciju pārbaudes bieži ir noteicošās.

Saskaņā ar pirmās paaudzes 5. Eirokodeksu ar vibrācijām saistīti projektēšanas pamatkritēriji ir:

- konstrukcijas pašvārstību frekvence;
- momentānā izliece no 1 kN lielas koncentrētas slodzes;
- vienības impulsa reakcijas ātrums ($m/N \cdot s^2$), kas ir maksimālais sākotnējais vibrāciju ātrums (m/s), kuru izraisa idealizēta impulsa vienība (1 N·s), kas ir pielikta punktā, kur tā rada maksimālo pārseguma reakciju.

Par ieteicamo minimālo starpstāvu pārseguma konstrukciju pašvārstību frekvenci dzīvojamajās ēkās bija noteikti 8 Hz, bet, ja šī frekvence ir zemāka par 8 Hz, saskaņā ar standartu bija jāveic papildu izpēte [2].

Būvniecības nozare attīstās, un arī Eirokodekss ir jāpilnveido, lai tas aptvertu jaunas metodes, materiālus, normatīvās prasības un atbilstu sabiedrības aktuālajām vajadzībām. Gandrīz 10 gadu laikā, no 2012. līdz 2021. gadam, noritēja darbs pie Eirokodeksa otrās paaudzes, paredzot, ka 2028. gadā pirmo Eirokodeksu paudzi

oficiāli aizstās otrā paaudze. Šī procesa ietvaros tika izstrādāti arī jaunie projektēšanas standarti koka grīdu vibrāciju pārbaudēm CEN TC250/SC5 WG3 4. apakšgrupā “Vibrācijas”, kas ievieš jaunas pārbaudes A un B lietošanas kategoriju ēkām. Tāpat šie standarti piedāvā aprēķina kritērijus koka grīdu konstrukcijām ar pašsvārstību frekvences vērtību robežās starp 4,5 Hz un 8 Hz, šādā veidā palielinot koka grīdu konstrukciju izmantošanas robežas.

01



Koka grīdu vibrāciju pārbaudes

Otrās paaudzes 5. Eurokodekss piedāvā vibrāciju pārbaužu metodi koka grīdām ar pašsvārstības frekvenci vismaz 4,5 Hz [3]. Vibrāciju pārbaužu pamatā ir trīs kritēriji:

- stinguma kritērijs;
- paātrinājuma kritērijs;
- ātruma kritērijs.

Līdzīgi kā pirmās paaudzes 5. Eurokodeksā, saglabājas pārbaude uz izlieci no pieliktā 1 kN liela koncentrēta spēka jeb tā saucamais stinguma kritērijs, taču tiek ieviesti jauni jēdzieni – paātrinājuma un ātruma kritēriji –, ko pārbauda atkarībā no grīdas pašsvārstību frekvences līmeņa. Jaunie noteikumi paredz projektēšanas nosacījumus pārsegumiem ar pašsvārstību frekvenci robežās no 4,5 Hz līdz 8 Hz neieskaitot, kur jāizpildās tā saucamajam paātrinājuma kritērijam. Pārsegumiem ar pašsvārstību frekvenci no 8 Hz tiek ieviests ātruma kritērijs. Papildus tam ir ieviests grīdas darbības līmeņa jēdziens (*Floor performance level*), kas paredz dažādas vibrāciju kritēriju robežvērtības atkarībā no ēkas lietošanas kategorijas un izvēlētā grīdas kvalitātes līmeņa.

1.1. VIBRĀCIJU KRITĒRIJU ROBEŽVĒRTĪBU NOTEIKŠANA

Ir iespējami septiņi grīdas darbības līmeņi atkarībā no ēkas lietošanas kategorijas un izvirzītajām kvalitātes prasībām. Grīdas darbības līmeņa noteikšana no I līdz VI ir veicama saskaņā ar 1.1. tabulu. Grīdas darbības VII līmenim atbilst gadījums, kad koka grīdai netiek izvirzīti ar grīdas vibrācijām saistīti kritēriji. Visu vibrāciju kritēriju robežvērtības atbilstoši noteiktajam grīdas darbības līmenim ir apkopotas 1.2. tabulā.

1.1. tabula

Grīdas darbības līmenis saskaņā ar lietošanas kategoriju un kvalitātes klasi

Lietošanas kategorija	Kvalitātes klase		
	Augsta	Standarta	Ekonomiskā
Daudzstāvu dzīvojamās ēkas, A1	I, II, III	IV	V
Privātmājas, A2	I, II, III, IV	V	VI
Biroju ēkas, B	I, II	III	IV

1.2. tabula

Vibrācijas kritēriju robežvērtības saskaņā ar grīdas darbības līmeni

Kritērijs	Grīdas darbības līmenis						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
Stinguma: $w_{1kN} \text{ (mm)} \leq [w]$	0,25		0,5	0,8	1,2	1,6	Nav
Ātruma un paātrinājuma: $R \leq [R]$	4	8	12	16	24	32	

1.2. KOKA GRĪDU RAKSTURLIELUMI

1.2.1. Grīdas rimšanas koeficients

Vibrācijas ir svārstības, un reālas konstrukcijas gadījumā tām ir raksturīga rimšana, proti, svārstību amplitūdas pakāpeniska samazināšanās. To, cik ātri konstrukcija atgriežas miera stāvoklī, apkārtējās vides pretestībai izkliešot svārstību enerģiju, raksturo rimšanas koeficients ζ . Ja hipotētiski pieļaujam gadījumam, ka svārstību enerģija nezūd, iegūst svārstības bez rimšanas – ar rimšanas koeficientu $\zeta=0$. Ja, ierosinot svārstību, sistēma visīsākajā iespējamajā laikā nokļūst miera stāvoklī, kritiskās rimšanas koeficients $\zeta=1$. Grīdas konstrukcijām parasti ir raksturīgs rimšanas koeficients $0 < \zeta < 1$. Atkarībā no koka grīdas veida rimšanas koeficienta vērtību var noteikt pēc 1.3. tabulas vai arī eksperimentāli saskaņā ar prEN 16929.

1.3. tabula

Dažāda veida koka grīdu rimšanas koeficienta vērtības

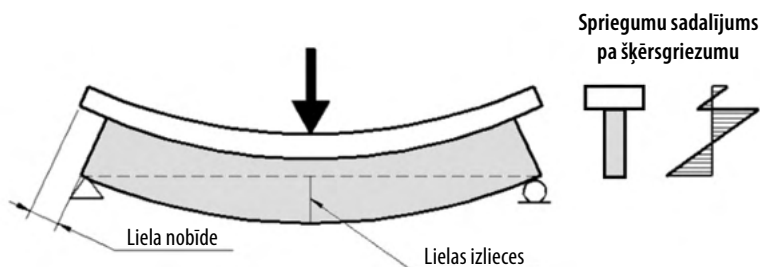
Rimšanas koeficients ζ	Koka grīdas veids
0,020	Ar koka sijām
0,025	Koka-betona kompozīta (<i>timber-concrete composite</i>) grīdas un masīvas grīdas
0,030	Ar koka sijām un peldošu slāni jeb slāni, kas nav piestiprināts pie pamatgrīdas konstrukcijas
0,035	Koka-betona kompozīta grīdas un masīvas grīdas ar peldošu slāni
0,040	Visas grīdas ar peldošu slāni, kas ir balstītas uz četrām malām

1.2.2. Grīdas efektīvais lieces stingums

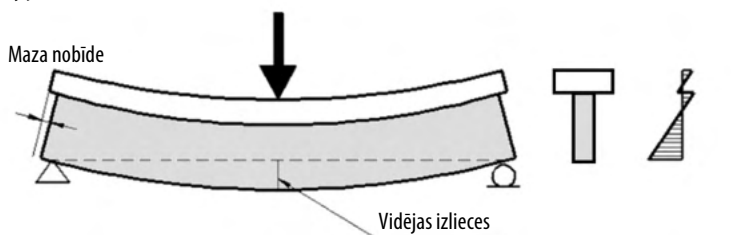
Koka grīdas efektīvā lieces stinguma noteikšanai var izmantot gamma metodi (γ metode) jeb salikta šķērsriezuma siju metodi saskaņā ar EN 1995-1-1:2004 B pielikuma vadlīnijām [2].

Gamma metode ir balstīta uz lineāri elastīga ķermeņa teoriju un sākotnēji tika izstrādāta saliktām sijām (T, I, kārbveida sijām), kuru atsevišķās daļas ir savienotas savā starpā ar mehāniskajiem savienotājlīdzekļiem, ar nobīdes moduli K , ar konstantu vai vienmērīgi mainīgu attālumu s starp savienotājlīdzekļiem. Saskaņā ar šo metodi sija tiek projektēta, izmantojot šķērsriezuma efektīvo stingumu $(EI)_{ef}$, kas ir atkarīgs no sijas šķērsriezuma īpašībām un sijas šķērsriezuma stinguma parametriem, ņemot vērā savienotājlīdzekļu elastīgo uzvedību nobīdes

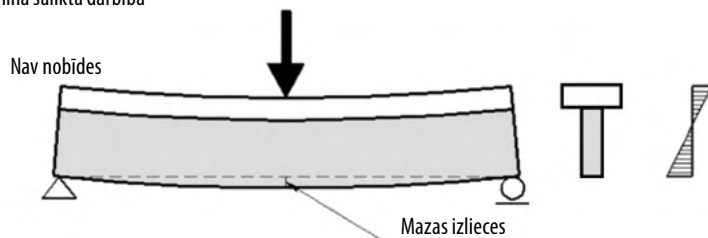
(a) Bez saliktas darbības



(b) Daļēja salikta darbība



(c) Pilna salikta darbība



1.1. att. Salikta šķērsriezuma sijas darbība liecē (a) bez saliktas darbības, (b) ar daļēju saliktu darbību, (c) ar pilnu saliktu darbību.

plaknēs, kas tiek ievērtēta ar attiecību s/K [4]. Konstrukcijai strādājot liecē, starp tās slāņiem veidojas bīdes spriegumi. Saliktas darbības pakāpe starp konstrukcijas elementiem jeb slāņiem raksturo, vai bīdes spriegumi no viena konstrukcijas slāņa pāriet uz otru. Gammās metodē šo saliktas darbības pakāpi raksturo ar stinguma redukcijas faktoru γ . Stinguma redukcijas faktora vērtība var būt robežās no 0 līdz 1. Ja starp konstrukcijas elementiem nav saliktas darbības, proti, elementi nav savstarpēji savienoti un reaģē uz slodzi katrs atsevišķi, stinguma redukcijas faktors ir vienāds ar nulli (1.1. (a) attēls). Kā piemērs šim gadījumam var būt divi koka dēļi, kas ir vienkārši uzlikti viens virs otra. Redukcijas faktors, kas ir vienāds ar 1, raksturo pilnu saliktu darbību jeb tādu savienojumu starp konstrukcijas elementiem, kas spēj nodrošināt pilnu šķērsspēka pārnasi, nepieļaujot konstrukcijas elementu savstarpēju nobīdi (1.1. (c) attēls). Šādā gadījumā konstrukcijas elementi reaģē uz slodzi kā viens vesels elements. Ar mehāniskajiem savienotājlīdzekļiem ir iespējams nodrošināt daļēju saliktu darbību (1.1. (b) attēls).

Ja mehānisko savienotājlīdzekļu vietā veido adhezīvu jeb limētu savienojumu, starp elementiem veidojas gandrīz stings savienojums, kas palielina saliktā elementa stingumu un vienkāršo tā aprēķinu [5]. Pilnas saliktas darbības gadījumā stinguma redukcijas faktors $\gamma = 1$ un šķērssgriezuma efektīvo stingumu $(EI)_{ef}$ var aprēķināt pēc 1.1. formulas:

$$(EI)_{ef} = \sum_{i=1}^n (E_i \times I_i + \gamma_i \times E_i \times A_i \times a_i^2), \quad (1.1.)$$

kur E_i – attiecīgās kārtas materiāla elastības modulis, MPa; I_i – attiecīgās kārtas inerces moments, mm^4 ; γ_i – savienojuma stinguma redukcijas faktors līmētā savienojuma gadījumā $\gamma = 1$; A_i – attiecīgās kārtas šķērssgriezuma laukums, mm^2 ; a_i – attālums no attiecīgās kārtas smaguma centra līdz šķērssgriezuma neitrālajai asij, mm.

Viens no 21. gadsimtā izmantojamiem koka grīdu risinājumiem ir krusteniski līmēta koka (CLT) plātnes. CLT ir industriāli ražota vairāku kārtu masīvkoka plātne, kas sastāv no ražošanas procesā plaknē salīmētiem perpendikulāri novietotiem dēļiem, kā rezultātā šim izstrādājumam samazinās anizotropijas līmenis. Plātnēm ir plašs izmēru klāsts, tās var izmantot arī lieliem laidumiem. Pastāv ražotnes, kas izgatavo plātnes, kuru garums ir pat lielāks par 20 m. CLT plātnes izmanto kā saliekamos nesošo konstrukciju būvelementus, ko ražo pēc pasūtījuma. Kopš 2015. gada Latvijā ir parādījušās jau vairākas CLT ražotnes, tāpēc CLT plātnes var uzskatīt par jaunu vietējo koka būvmateriālu.

Nemot vērā CLT uzbūvi (vairāki koksnes slāņi ar atšķirīgām mehāniskajām īpašībām), efektīvā lieces stinguma aprēķinos ir ērti izmantot reducēto šķērssgriezumu metodi, reducējot visu šķērssgriezumu uz viena slāņa mehāniskajām īpašībām. Reducēto šķērssgriezumu iegūst, izmantojot redukcijas faktoru n , kas ir elastības moduļu attiecība [6, 7]. Tā, piemēram, CLT šķērssgriezuma uz garenisko kārtu materiāla mehāniskajām īpašībām redukcijas faktoru nosaka kā:

$$n = \frac{E_t}{E_l}, \quad (1.2.)$$

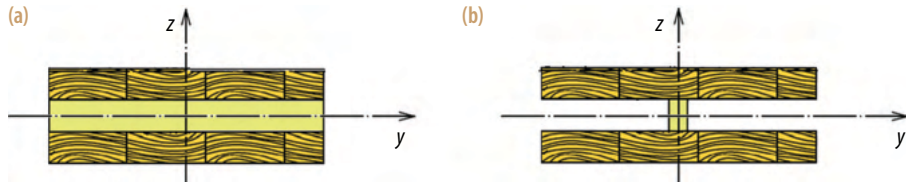
kur E_t – *CLT* šķērskārtu elastības modulis, MPa; E_l – *CLT* garenisko kārtu elastības modulis, MPa.

Materiālu slāņu augstums paliek nemainīgs, šķērsgriezuma maiņa notiek uz platumu rēķina pēc formulas:

$$b_{l,eq} = b_l \times n, \quad (1.3.)$$

kur $b_{l,eq}$ – uz *CLT* garenisko kārtu īpašībām reducētais šķērskārtas platums, mm; b_b – *CLT* šķērskārtu platums, parasti 1000 mm; n – redukcijas faktors.

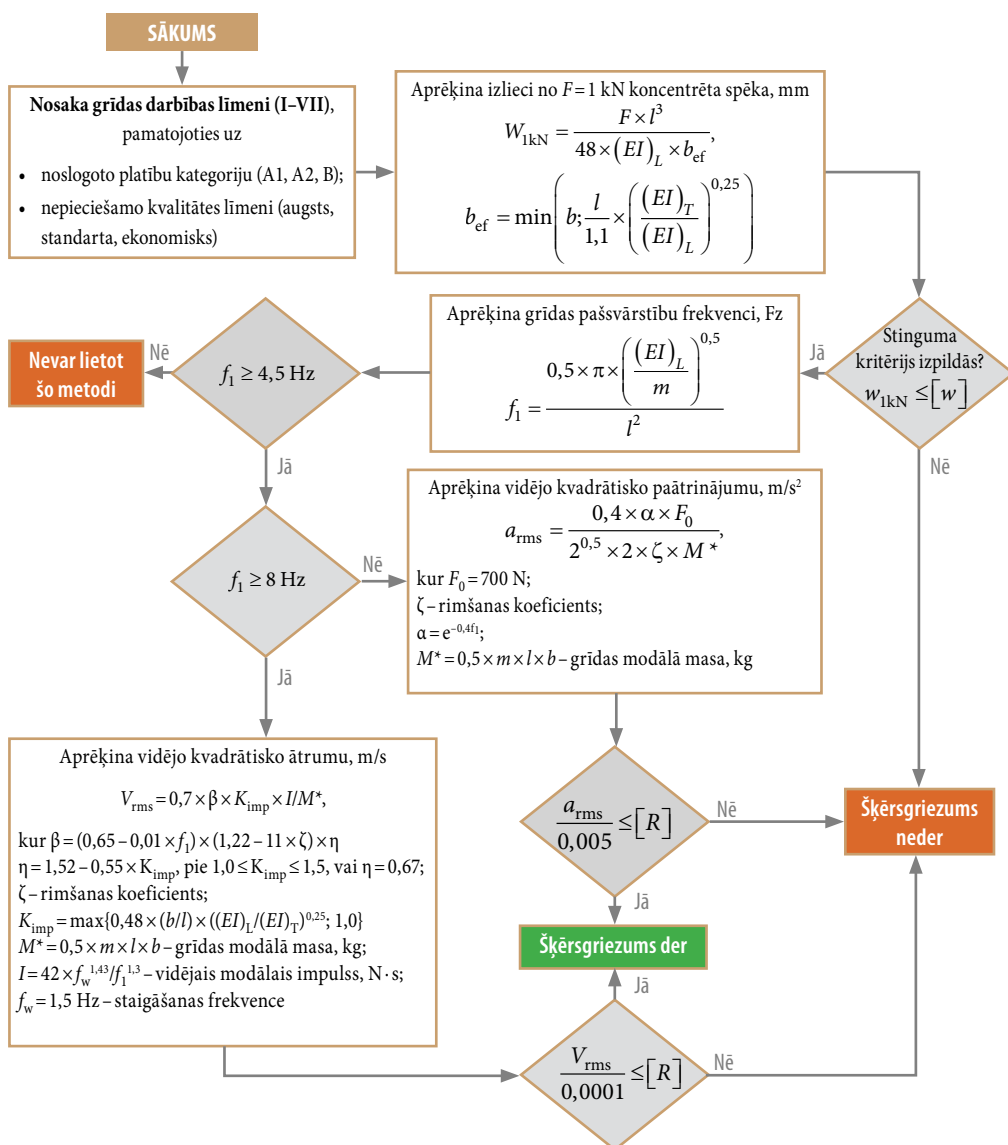
1.2. attēlā var redzēt uz *CLT* garenisko kārtu materiāla īpašībām reducēto *CLT* šķērsgriezumu. Reducēšanas rezultātā visiem šķērsgriezuma slāņiem ir vienāds elastības modulis.



1.2. att. *CLT* (a) šķērsgriezums, (b) uz garenisko kārtu materiāla īpašībām reducētais šķērsgriezums.

1.3. VIBRĀCIJU PĀRBAUDES ALGORITMS

Vienā virzienā balstītu koka grīdu ar laidumu l , platumu b un pašsvara masu uz vienu kvadrātmetru m , kuru raksturo efektīvie lieces stingumi uz vienu metru platu joslu $(EI)_L$ un $(EI)_T$, attiecīgi grīdas garenvirzienā un šķērsvirzienā vibrāciju pārbaudes procedūra ir atspoguļota 1.3. attēlā.



1.3. att. Koka grīdu vibrāciju pārbaudes procedūra pēc otrās paaudzes 5. Eirokodeksa, kur [] ir robežvērtība saskaņā ar 1.2. tabulu [8].

02

Skaitliskie piemēri

Vibrāciju pārbaudes veiktas vienā virzienā liecei pakļautu koka grīdu ar vienu laidumu divām konstrukciju modifikācijām:

- grīdai ar *CLT* plātnēm pamatā;
- koka-betona kompozīta grīdai ar *CLT*.

Abiem grīdu veidiem kā izejas dati pieņemti A1 ēku lietošanas kategorija, proti, daudzstāvu dzīvojamās ēkas un standarta grīdas kvalitātes klase. Saskaņā ar 1.1 un 1.2. tabulu grīdas darbības līmenis ir noteikts IV ar vibrācijas kritēriju robežvērtībām $[w] = 0,8$ un $[R] = 16$. Par kopējo grīdas platumu b ir pieņemti 4,8 metri. Grīda veidota no plātnēm ar laidumu $l = 6$ m un plātnes platumu $B = 1,2$ m. Grīdas plātnes balstītas uz nesošajām sienām, ko uzskata par stingriem balstiem. Abiem grīdas konstruktīvajiem risinājumiem rimšanas koeficients ir pieņemts $\zeta = 0,025$ (sk. 1.3. tabulu).

Ņemot vērā lielo attiecību starp grīdas plātnes garumu un augstumu (vismaz 30), bīdes deformācija aprēķinos ignorēta [9]. *CLT* plātņu šķērskārtas aprēķinos tiek ņemtas vērā, reducējot tās uz gareniski orientēto slāņu materiāla īpašībām.

2.1. GRĪDAS VIBRĀCIJU PĀRBAUDES AR $f_1 > 8$ HZ

Vibrāciju pārbaudes veiktas *CLT* plātnei, kuras kopējais augstums ir 160 mm un kura sastāv no pieciem slāņiem. Slāņu biezumi ir redzami 2.1. attēlā. Plātnes garuma un augstuma attiecība ir $6000 / 160 = 37,5$, tāpēc šķērsdeformācijas var ignorēt.

Izmantotās koksnes stiprības klase ir C24, līdz ar to gareniski orientēto kārtu elastības modulis $E_t = 11\,000$ MPa, un šķērskārtu elastības modulis $E_t = 370$ MPa. *CLT* plātnes vidējais blīvums $\rho = 420$ kg/m³. *CLT* plātnes pašsvara masa uz vienu kvadrātmetru ir:

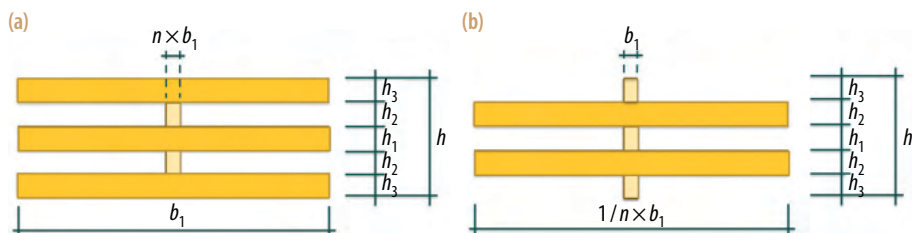
$$m = \rho \times h = 420 \times 0,16 = 67,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}.$$

CLT grīdas efektīvo lieces stingumu uz vienu metru platu joslu $(EI)_L$ grīdas garenvirzienā un $(EI)_T$ grīdas šķērsvirzienā aprēķina, nosakot šķērsriezuma inerces momentu pēc reducētā šķērsriezuma metodes (2.2. att.).

$$\begin{aligned}
 (EI)_L &= E_l \times \left[\frac{b_1 \times h^3}{12} - 2 \times \left[\frac{\left(b_1 - b_1 \times \frac{E_t}{E_l} \right) \times h_2^3}{12} + \left(b_1 - b_1 \times \frac{E_t}{E_l} \right) \times h_2 \times \left(\frac{h_2 + h_1}{2} \right)^2 \right] \right] = \\
 &= 11000 \times \left[\frac{10^3 \times 160^3}{12} - 2 \times \left[\frac{\left(10^3 - 10^3 \frac{370}{11000} \right) \times 30^3}{12} + \left(10^3 - 10^3 \frac{370}{11000} \right) \times 30 \times \left(\frac{30 + 40}{2} \right)^2 \right] \right] = \\
 &= 2,926 \times 10^{12} \text{ N} \cdot \text{mm}^2
 \end{aligned}$$



2.1. att. CLT plātnes šķērsriezums.



2.2. att. Vienu metru platas CLT plātnes joslas reducētais šķērsriezums: (a) uz gareniski orientēto kārtu mehāniskajām īpašībām grīdas garenvirzienā; (b) uz šķērsvirzienā orientēto kārtu mehāniskajām īpašībām grīdas šķērsvirzienā.

$$\begin{aligned}
 (EI)_T &= E_t \times \left[\frac{b_1 \times h^3}{12} + 2 \times \left[\frac{\left(b_1 \times \frac{E_l}{E_t} - b_1 \right) \times h_2^3}{12} + \left(b_1 \times \frac{E_l}{E_t} - b_1 \right) \times h_2 \times \left(\frac{h_2 + h_1}{2} \right)^2 \right] \right] = \\
 &= 370 \times \left[\frac{10^3 \times 160^3}{12} + 2 \times \left[\frac{\left(10^3 \times \frac{11000}{370} - 10^3 \right) \times 30^3}{12} + \left(10^3 \times \frac{11000}{370} - 10^3 \right) \times 30 \times \left(\frac{30 + 40}{2} \right)^2 \right] \right] = \\
 &= 9,554 \times 10^{11} \text{ N} \cdot \text{mm}^2
 \end{aligned}$$

Grīdas efektīvo platumu b_{ef} nosaka pēc 2.1. formulas:

$$b_{ef} = \min \left[b; \frac{l}{1,1} \times \left(\frac{(EI)_T}{(EI)_L} \right)^{0,25} \right], \quad (2.1)$$

kur b ir grīdas platums, mm; l ir grīdas laidums, mm; $(EI)_L$ un $(EI)_T$ ir efektīvie lieces stingumi vienu metru platai joslai attiecīgi grīdas garenvirzienā un šķērsvirzienā, N·mm².

$$b_{ef} = \min \left[4800; \frac{6000}{1,1} \times \left(\frac{9,554 \times 10^{11}}{2,926 \times 10^{12}} \right)^{0,25} = 4123 \right] = 4123 \text{ mm}$$

Grīdas stinguma kritērija pārbaudei aprēķina izlieci $w_{1\text{kN}}$ no 1 kN liela koncentrēta spēka laiduma vidū pēc 2.2. formulas:

$$w_{1\text{kN}} = \frac{F \times l^3}{48 \times (EI)_L \times b_{ef}}, \quad (2.2)$$

kur $F = 1$ kN; l ir grīdas laidums, m; $(EI)_L$ ir efektīvais lieces stingums vienu metru platai joslai grīdas garenvirzienā, kN·m²/m; b_{ef} ir grīdas efektīvais platums, m.

$$w_{1\text{kN}} = \frac{1 \times 6^3}{48 \times 2,926 \times 10^3 \times 4,123} \times 1000 = 0,37 \text{ mm}$$

Stinguma kritērija izpildīšanās pārbaude:

Vai $w_{1\text{kN}} \leq [w]$?

$$0,37 < 0,8 \rightarrow \text{stinguma kritērijs izpildās.}$$

Pašvārstību frekvenci taisnstūra formas grīdām ar vienu laidumu, kuras uzņem lieces spriegumus vienā virzienā, ir balstītas tieši uz stingiem balstiem un pārsvarā ir pakļautas izkliedētai slodzei, var aprēķināt pēc 2.3. formulas:

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \times l^2} \times \sqrt{\frac{(EI)_L}{m}}, \quad (2.3.)$$

kur l ir grīdas laidums, m; $(EI)_L$ ir efektīvais lieces stingums vienu metru platai joslai grīdas garenvirzienā, N·m²/m; m ir plātnes pašsvara masa uz vienu kvadrātmetru, kg/m².

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \times 6^2} \times \sqrt{\frac{2,926 \times 10^6}{67,2}} = 9,1 \text{ Hz} > 8 \text{ Hz} \rightarrow \text{jāpārbauda ātruma kritērijs.}$$

Vidējo kvadrātisko ātrumu aprēķina pēc 2.4. formulas:

$$V_{\text{rms}} = 0,7 \times \beta \times K_{\text{imp}} \times \frac{I}{M^*}, \quad (2.4.)$$

kur 0,7 ir redukcijas koeficients attāluma starp vibrācijas ierosinošo avotu un uztverošo personu dēļ; β ir koeficients, ko aprēķina pēc 2.5. formulas; K_{imp} ir palielinošs koeficients, ko aprēķina pēc 2.6. formulas; I ir vidējais modālais impulss, N·s, ko aprēķina pēc 2.7. formulas; M^* ir grīdas modālā masa, kg, ko grīdām, kas ir balstītas uz divām malām, aprēķina pēc 2.8. formulas.

$$\beta = (0,65 - 0,01 \times f_1) \times (1,22 - 11 \times \zeta) \times \eta, \quad (2.5.)$$

kur f_1 ir grīdas pašvārstību frekvence, Hz; ζ ir rimšanas koeficients (skat. 1.2.1. nodaļu); $\eta = 1,52 - 0,55 \times K_{\text{imp}}$ pie $1,0 \leq K_{\text{imp}} \leq 1,5$, vai arī $\eta = 0,69$.

$$K_{\text{imp}} = \max \left(0,48 \times \frac{b}{l} \times \left(\frac{(EI)_L}{(EI)_T} \right)^{0,25}; 1,0 \right), \quad (2.6.)$$

kur b ir grīdas platums, m; l ir grīdas laidums, m; $(EI)_L$ un $(EI)_T$ ir efektīvie lieces stingumi vienu metru platai joslai attiecīgi grīdas garenvirzienā un šķērsvirzienā, N·m²/m.

$$I = 42 \times \frac{f_w^{1,43}}{f_1^{1,3}}, \quad (2.7.)$$

kur $f_w = 1,5$ Hz ir staigāšanas frekvence; f_1 ir grīdas pašvārstību frekvence, Hz.

$$M^* = \frac{m \times l \times b}{2}, \quad (2.8.)$$

kur m ir plātnes pašsvara masa uz vienu kvadrātmetru, kg/m²; b ir grīdas platums, m; l ir grīdas laidums, m.

Vidējā kvadrātiskā ātruma noteikšanai nepieciešamo mainīgo aprēķins ir apkopots 2.1. tabulā.

Mainīgie vidējā kvadrātiskā ātruma noteikšanai

Mainīgais	Aprēķins	Rezultāts
M^*	$\frac{67,2 \times 6 \times 4,8}{2}$	967,68
l	$42 \times \frac{1,5^{1,43}}{9,1^{1,3}}$	4,25
K_{imp}	$\max \left(0,48 \times \frac{4,8}{6} \times \left(\frac{2,926 \times 10^6}{9,554 \times 10^5} \right)^{0,25} = 0,51; 1,0 \right)$	1,0
η	$1,52 - 0,55 \times K_{imp}$	0,97
β	$(0,65 - 0,01 \times 9,1) \times (1,22 - 11 \times 0,025) \times 0,97$	0,51
V_{rms}	$0,7 \times 0,51 \times 1,0 \times \frac{4,25}{967,68}$	0,001568

Ātruma kritērija izpildīšanās pārbaude:

$$\text{Vai } \frac{V_{rms}}{0,0001} \leq [R]?$$

$$15,68 < 16 \rightarrow \text{ātruma kritērijs izpildās.}$$

Pieņemtais *CLT* plātnes šķērsgriezums, kura kopējais augstums ir 160 mm, atbilst prasībām attiecībā uz grīdas pašsvārstību frekvenci un ātrumu, kā arī grīdas stingumu, kas ir iekļautas otrās paaudzes 5. Eirokodeksā.

2.2. GRĪDAS VIBRĀCIJU PĀRBAUDES AR $4,5 \text{ Hz} \leq f_1 < 8 \text{ Hz}$

Konstrukciju veidošana no koka-betona kompozīta ir salīdzinoši jauna tehnoloģija. Pirmās koka-betona kompozīta konstrukcijas tika izstrādātas jau 20. gadsimta sākumā. Šo grīdu rašanās iemesls ir saistīts ar tērauda trūkumu betona stiegrošanai [10]. Nopietni pētījumi par koka-betona kompozītu Eiropā sākās tikai pēc 20. gadsimta 60. gadiem [11]. Pēc pirmajiem mēģinājumiem ar kokbetonu ietaupīt betona stiegrošanai paredzēto tēraudu koka-betona tehnoloģiju sāka lietot arī veco vēsturisko ēku koka grīdu atjaunošanai. Šī tehnoloģija pierādīja savu efektivitāti, uzlabojot koka grīdas uzvedību vēsturiskajās ēkās, kur būtiski bija saglabāt autentiskus griesus, jo atjaunošanas darbus varēja veikt tikai no starpstāvu pārseguma augšpusē. Mūsdienās koka-betona kompozīta tehnoloģija attīstās un tā izmantošana jaunu ēku būvniecībā aizvien pieaug.

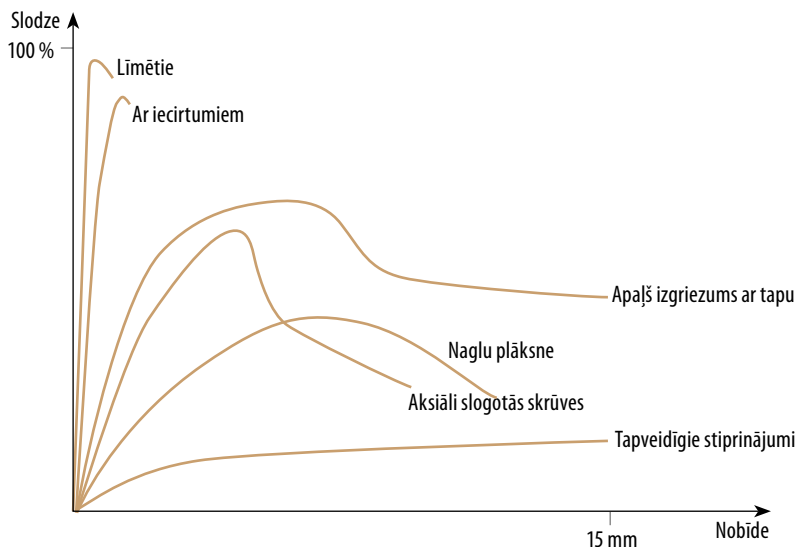
Sinēģija jeb kompozīta kopdarbības pakāpe starp abiem atšķirīgajiem materiāliem rodas, pateicoties savienojumam starp materiālu slāņiem. Pateicoties slāņu

kopdarbībai, kompozītam piemīt abu materiālu labākās īpašības, jo kompozīta darbība notiek, ja divi konstrukcijas elementi vai materiāli ir savienoti kopā tādā veidā, ka tie reaģē uz slodzi kā viens elements un ar lielāku stingumu vai izturību, salīdzinot ar katru elementu atsevišķi.

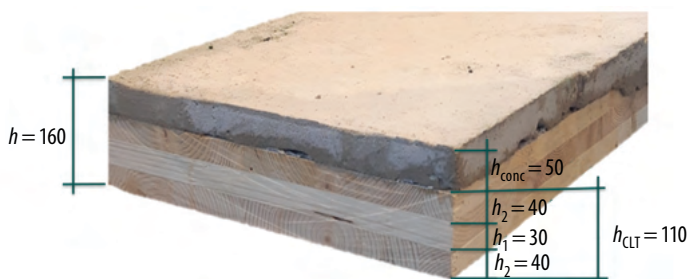
Pētnieks *Alfredo Dias* savā promocijas darbā [12] ir apkopojis informāciju par betona un koksnes slāņu savstarpējo uzvedību, izmantojot dažāda veida savienojumus. 2.3. attēlā var redzēt salīdzinājuma liknes, kas raksturo nobīdi, kādu izraisa bīdes spēks, kas veidojas starp koksnes un betona slāņiem dažāda veida savienojumu gadījumā.

Līmes un epoksīdsveķu izmantošana savienojumos nodrošina stingu savienojumu un efektīvu materiālu salikto darbību, tāpēc vibrāciju pārbaudes šī piemēra ietvaros veic koka-betona kompozīta grīdai ar adhezīvo savienojumu starp betona un CLT slāņiem.

Skaitliskā piemēra ietvaros vibrāciju pārbaudes veic koka-betona kompozīta konstrukcijai, kuras kopējais augstums ir 160 mm un kura sastāv no trīs slāņu CLT plātnes un 50 mm bieza betona slāņa. Slāņu biezumi ir redzami 2.4. attēlā.



2.3. att. Dažāda veida savienojumu tipiskā slodzes-nobīdes uzvedība [12].



2.4. att. Koka-betona kompozīta konstrukcijas ar CLT plātni šķērsgriezums.

Izmantotās koksnes stiprības klase ir C24, līdz ar to gareniski orientēto kārtu elastības modulis $E_l = 11\,000$ MPa, un šķērskārtu elastības modulis $E_t = 370$ MPa. CLT plātnes vidējais blīvums $\rho = 420$ kg/m³. Betona stiprības klase ir C40, elastības modulis $E_{\text{conc}} = 35$ GPa. Betona blīvums ir pieņemts $\rho_{\text{conc}} = 2500$ kg/m³.

Koka-betona kompozīta konstrukcijas pašsvara masa uz vienu kvadrātmetru ir:

$$m = \rho \times h_{\text{CLT}} + \rho_{\text{conc}} \times h_{\text{conc}} = 420 \times 0,11 + 2500 \times 0,05 = 171,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}.$$

Lai atvieglotu efektīvā lieces stinguma noteikšanu, aprēķina koka-betona kompozīta konstrukcijas vienu metru platai (b_1) CLT plātnes joslai reducētos laukumus $A_{\text{CLT},l}$ un $A_{\text{CLT},t}$, reducētos inerces momentus $I_{\text{CLT},l}$ un $I_{\text{CLT},t}$, kā arī koka-betona kompozīta konstrukcijas šķērsgriezumu smaguma centrus $sm.c_l$ un $sm.c_t$ attiecīgi grīdas garenvirzienā un šķērsvirzienā saskaņā ar 2.5 attēlu. Ģeometrisko parametru aprēķins ir apkopots 2.2. tabulā.

2.2. tabula

Ģeometriskie parametri lieces stinguma noteikšanai

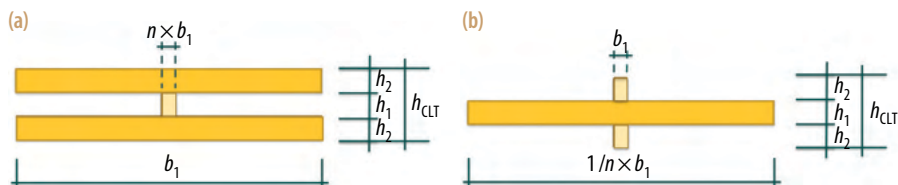
Parametrs	Aprēķins	Rezultāts
$A_{\text{CLT},l}$	$\frac{E_t \times h_1 + E_l \times 2 \times h_2}{E_l} \times b_1 = \frac{370 \times 30 + 11000 \times 2 \times 40}{11000} \times 1000$	81 009 mm ²
$A_{\text{CLT},t}$	$\frac{E_l \times h_1 + E_t \times 2 \times h_2}{E_t} \times b_1 = \frac{11000 \times 30 + 370 \times 2 \times 40}{370} \times 1000$	97 892 mm ²
$I_{\text{CLT},l}$	$\left(\frac{b_1 \times h_{\text{CLT}}^3}{12} - \frac{\left(b_1 - b_1 \times \frac{E_t}{E_l} \right) \times h_1^3}{12} \right) = \left(\frac{1000 \times 110^3}{12} - \frac{\left(1000 - 1000 \times \frac{370}{11000} \right) \times 30^3}{12} \right)$	$108,74 \times 10^6$ mm ⁴
$I_{\text{CLT},t}$	$\left(\frac{b_1 \times h_{\text{CLT}}^3}{12} + \frac{\left(b_1 - b_1 \times \frac{E_l}{E_t} \right) \times h_1^3}{12} \right) = \left(\frac{1000 \times 110^3}{12} + \frac{\left(1000 - 1000 \times \frac{11000}{370} \right) \times 30^3}{12} \right)$	$175,56 \times 10^6$ mm ⁴
$sm.c_l$	$\frac{E_l \times A_{\text{CLT},l} \times h_{\text{CLT}} / 2 + E_{\text{conc}} \times b_1 \times h_{\text{conc}} \times \left(h - \frac{h_{\text{conc}}}{2} \right)}{E_l \times A_{\text{CLT},l} + E_{\text{conc}} \times b_1 \times h_{\text{conc}}} = \frac{11000 \times 81009 \times \frac{110}{2} + 35000 \times 1000 \times 50 \times \left(160 - \frac{50}{2} \right)}{11000 \times 81009 + 35000 \times 1000 \times 50}$	108,0 mm
$sm.c_t$	$\frac{E_t \times A_{\text{CLT},t} \times \frac{h_{\text{CLT}}}{2} + E_{\text{conc}} \times b_1 \times h_{\text{conc}} \times \left(h - \frac{h_{\text{conc}}}{2} \right)}{E_t \times A_{\text{CLT},t} + E_{\text{conc}} \times b_1 \times h_{\text{conc}}} = \frac{370 \times 971892 \times \frac{110}{2} + 35000 \times 1000 \times 50 \times \left(160 - \frac{50}{2} \right)}{370 \times 971892 + 35000 \times 1000 \times 50}$	121,4 mm

Koka-betona kompozīta konstrukcijas efektīvais lieces stingumu uz vienu metru platu joslu $(EI)_L$ grīdas garenvirzienā un $(EI)_T$ grīdas šķērsvirzienā aprēķina, izmantojot gammas metodi, pieņemot, ka savienojums starp betona un koksnes slāņiem ir stings un redukcijas faktors $\gamma = 1$.

$$\begin{aligned}
 (EI)_L &= E_l \times \left(I_{CLT,l} + A_{CLT,l} \times \left(sm.c_l - \frac{h_{CLT}}{2} \right)^2 \right) + \\
 &+ E_{conc} \times \left(\frac{b_1 \times h_{conc}^3}{12} + b_1 \times h_{conc} \times \left(h - sm.c_l - \frac{h_{conc}}{2} \right)^2 \right) = \\
 &= 11000 \times \left(108,74 \times 10^6 + 81009 \times \left(108,0 - \frac{110}{2} \right)^2 \right) + \\
 &+ 35000 \times \left(\frac{1000 \times 50^3}{12} + 1000 \times 50 \times \left(160 - 108,0 - \frac{50}{2} \right)^2 \right) = 5,340 \times 10^{12} \text{ N} \cdot \text{mm}^2 \\
 (EI)_T &= E_t \times \left(I_{CLT,t} + A_{CLT,t} \times \left(sm.c_t - \frac{h_{CLT}}{2} \right)^2 \right) + \\
 &+ E_{conc} \times \left(\frac{b_1 \times h_{conc}^3}{12} + b_1 \times h_{conc} \times \left(h - sm.c_t - \frac{h_{conc}}{2} \right)^2 \right) = \\
 &= 370 \times \left(175,56 \times 10^6 + 971892 \times \left(121,4 - \frac{110}{2} \right)^2 \right) + \\
 &+ 35000 \times \left(\frac{1000 \times 50^3}{12} + 1000 \times 50 \times \left(160 - 121,4 - \frac{50}{2} \right)^2 \right) = 2,339 \times 10^{12} \text{ N} \cdot \text{mm}^2
 \end{aligned}$$

Grīdas efektīvo platumu b_{ef} nosaka pēc 2.1. formulas:

$$b_{ef} = \min \left(4800; \frac{6000}{1,1} \times \left(\frac{2,339 \times 10^{12}}{5,340 \times 10^{12}} \right)^{0,25} \right) = 4437 = 4437 \text{ mm}.$$



2.5. att. Viena metra platas CLT plātnes joslas reducētais šķērsgriezums: (a) uz gareniski orientēto kārtu mehāniskajām īpašībām grīdas garenvirzienā; (b) uz šķērsvirzienā orientēto kārtu mehāniskajām īpašībām grīdas šķērsvirzienā.

Lai pārbaudītu grīdas stinguma kritēriju, pēc 2.2. formulas aprēķina izlieci $w_{1\text{kN}}$ no 1 kN liela koncentrēta spēka laiduma vidū:

$$w_{1\text{kN}} = \frac{1 \times 6^3}{48 \times 5,340 \times 10^3 \times 4,437} \times 1000 = 0,19 \text{ mm.}$$

Stinguma kritērija izpildīšanās pārbaude:

Vai $w_{1\text{kN}} \leq [w]$?

$$0,19 < 0,8 \rightarrow \text{stinguma kritērijs izpildās.}$$

Pašsvārstību frekvenci taisnstūra formas grīdām ar vienu laidumu, kas strādā vienā virzienā, ir balstītas tieši uz stingiem balstiem un pārsvarā ir pakļautas izkļiedātai slodzei, aprēķina pēc 2.3. formulas:

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \times 6^2} \times \sqrt{\frac{5,340 \times 10^6}{171,2}} = 7,7 \text{ Hz} < 8 \text{ Hz} \rightarrow \text{jāpārbauda paātrinājuma kritērijs.}$$

Vidējo kvadrātisko paātrinājumu aprēķina pēc 2.9. formulas:

$$a_{\text{rms}} = \frac{0,4 \times \alpha \times F_0}{\sqrt{2} \times 2 \times \zeta \times M^*}, \quad (2.9.)$$

kur α ir Furjē koeficients, kas ir atkarīgs no fundamentālās pašsvārstību frekvences un ko aprēķina pēc 2.10. formulas; F_0 ir staigājoša cilvēka radīta vertikālā slodze, ko parasti pieņem kā 700 N; ζ ir rimšanas koeficients (skat. 1.2.1. nodaļu); M^* ir grīdas modālā masa, kg, ko grīdām, kas ir balstītas uz divām malām, aprēķina pēc 2.8. formulas.

$$\alpha = e^{-0,4f_1}, \quad (2.10.)$$

kur e ir Eilera skaitlis, kas ir matemātiskā konstante un ir aptuveni vienāda ar 2,7182; f_1 ir grīdas pašsvārstību frekvence, Hz.

Vidējā kvadrātiskā paātrinājuma noteikšana ir apkopota 2.3. tabulā

2.3. tabula

Vidējā kvadrātiskā paātrinājuma noteikšana

Mainīgais	Aprēķins	Rezultāts
M^*	$\frac{171,2 \times 6 \times 4,8}{2}$	2465,3
α	$2,7182^{-0,4 \times 7,7}$	0,046
a_{rms}	$\frac{0,4 \times 0,046 \times 700}{\sqrt{2} \times 2 \times 0,025 \times 2465,3}$	0,0739

Ātruma kritērija izpildīšanas pārbaude:

$$\text{Vai } \frac{V_{\text{rms}}}{0,005} \leq [R]?$$

$14,78 < 16 \rightarrow$ ātruma kritērijs izpildās.

Pieņemtais koka-betona kompozīta ar *CLT* pamatā plātnes šķērsgriezums, kuras kopējais augstums ir 160 mm, atbilst prasībām attiecībā uz grīdas pašvārstību frekvenci un ātrumu, kā arī grīdas stingumu, kas ir iekļautas otrās paaudzes 5. Eirokodeksā.

Koka-betona kompozīta grīdas konstruktīvajam risinājumam raksturīgs gan lielāks lieces stingums, gan arī lielāka pašsvara masa, kas apskatāmajā gadījumā rezultējas fundamentālajā pašvārstību frekvencē (zemāka par 8 Hz). Saskaņā ar pirmās paaudzes 5. Eirokodeksā iekļauto metodoloģiju šāds risinājums prasītu papildu izpēti. Savukārt, pateicoties otrās paaudzes 5. Eirokodeksā iekļautajai metodoloģijai par vibrāciju pārbaudēm grīdām ar pašvārstību frekvenci robežās no 4,5 Hz līdz 8 Hz, apskatāmā koka-betona kompozīta konstrukcijas risinājuma vibrāciju pārbaude ir viegli īstenojama. Rezultātā, salīdzinot abus konstruktīvos risinājumus, kuru kopējais augstums ir 160 mm, var secināt, ka koka-betona kompozīta grīdas gadījumā prasības attiecībā uz grīdu vibrācijām izpildās ar lielāku rezervi.

LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] EN 1990: Eurocode - Basis of structural design, Brussels: CEN, 2002.
- [2] EN 1995-1-1 Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings, Brussels: CEN, 2004.
- [3] EN 1995-1-1 Vibrations, CEN, Project team SC5.T3, 2019.
- [4] I. Christovasilis, M. Brunetti, M. Follesa, M. Nocetti and D. Vassallo, "Evaluation of the Mechanical Properties of Cross Laminated Timber with Elementary Beam Theories," *Construction and Building Materials*, no. 112, pp. 202–213, 2016.
- [5] A. Dias, J. Schänzlin and P. Dietsch, Design of timber-concrete composite structures, Aachen: Shaker Verlag GmbH, 2018.
- [6] K. Buka-Vaivade, D. Serdjuks, V. Goremikins, L. Pakrastins and N. Vatin, "Suspension structure with cross-laminated timber deck panels," *Magazine of Civil Engineering*, vol. 7, no. 83, p. 126–135, 2018.
- [7] K. Buka-Vaivade, D. Serdjuks, V. Goremikins, A. Vilguts and L. Pakrastins, "Experimental Verification of Design Procedure for Elements from Cross-laminated Timber," *Procedia Engineering*, no. 172, pp. 1212–1219, 2017.
- [8] K. Buka-Vaivade, Inovatīvu koka-betona kompozītu konstrukciju racionāls risinājums. Promocijas darbs. Rīga: RTU, 120 lpp., 2022.
- [9] E. Karacabeyli and S. Gagnon, Canadian CLT Handbook 2019 edition, Pointe-Claire: FPInnovations, 2019.
- [10] R. Destro, G. Boscato, U. Mazzali, S. Russo, F. Peron and P. Romagnoni, "Structural and thermal behaviour of a timber-concrete prefabricated composite wall system," *Energy Procedia*, vol. 78, p. 2730–2735, 2015.
- [11] R. Selle, K. Holschemacher and B. Heiden, "An alternative approach for hybrid floors made of timber and concrete (TCCS)," *10th International Conference Modern Building Materials, Structures and Techniques*, pp. 778–786, 2010.
- [12] A. Dias, Mechanical behaviour of timber-concrete joints. Doctoral Thesis, Coimbra: University of Coimbra, 2005.

2023
