

GLEMŽIAMŲ ERDVINIŲ BETONINIŲ ELEMENTŲ SKAIČIAVIMAS

Linas Vasiliauskas, Kazys Šlezevičius, Jonas Roličius, Antanas Špokas
Šiaulių universitetas, Technologijos fakultetas

Įvadas

Betono ir gelžbetonio konstrukcijos plačiai naudojamos hidrotechninėje, civilinėje ir pramoninėje statyboje. Norint racionaliai projektuoti konstrukcijas, labai svarbu žinoti tikrąjį įtempių pasiskirstymą. Tikruosius įtempius galima apskaičiuoti teoriškai arba nustatyti eksperimentiniu būdu. Teorinis įtempių nustatymo uždavinys pakankamai sudėtingas [1, 2]. Didinant betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų apkrovimą, atsiranda plyšiai, keičiasi įtempių pasiskirstymas, ypač jų koncentracijos zonose [3]. Derinant duomenis apie įtempius su stiprumo teorijomis, tampa aiškesnis elementų darbas ir jų atlaikymo galios nustatymas [4, 5].

Didelės praktinės reikšmės turi konstrukcijų darbo tyrimai sutelktų jėgų perdavimo vietose. Apkrova nedidelėmis aikštelėmis gali būti perduodama konstrukcijų atramose, sijų inkarų įrenginiuose, įvairiuose sujungimuose. Dėl sutelktų jėgų veikimo atsirandančiai plokščiai ar erdvinei įtempių koncentracijai charakteringi ne tik dideli gniuždymo, bet ir tempimo bei tangentiniai įtempiai [4, 6, 7]. Atliekant eksperimentą ir teoriškai nagrinėjamas glemžiamų betoninių elementų stiprumas. Gauti eksperimentiniai ir teoriniai rezultatai palyginami.

Įtempių koncentracijos reiškiniai iki galo neišnagrinėti, todėl aktualūs ir sprendini.

Tikslas – išnagrinėti įtempimų-deformacijų būvį erdviniuose glemžiamuose elementuose.

Tyrimų metodika ir darbo rezultatai

Glemžiamų betoninių elementų stiprumui nustatyti pasinaudosime eksperimentiniais tyrimais ir stiprumo teorijomis.

Buvo išbandyti necentriškai apkrauti ($e = L / 6$) betoniniai bandiniai. B-1-1 ÷ B-1-9 serijos bandiniai buvo apkrauti 10×15 cm dydžio aikštele, kiti – 15×20 cm. Jie buvo apkrauti pakopomis, sudarančiomis 0,1 laukiamos ardomosios apkrovos. Apkrovimo simetriškumui patikrinti ant elemento šonų buvo tvirtinami specialūs 20 cm bazės tenzometrai. Kiekviena apkrovos pakopa buvo išlaikoma apie 15–20 minučių (laikas prietaisų parodymams atskaityti). Prieš suirimą, kai apkrova sudarydavo 0,8–0,9 laukiamos ardomosios, prietaisai buvo nuimami. Bandinių aukščio ir pločio santykis $\beta = H / L$ keitėsi nuo 0,6 iki 1,5.

Daugumoje bandinių po apkrovimo aikštele susidarydavo ardantis kūgis (žr. 1 pav.). Didinant apkrovą, medžiaga po šia aikštele sutankėja ir sustiprėja. Kūgis perplėšia bandinį. Kai apkrova pasiekia $0,6 \div 0,8$ ardomosios, bandiniuose, kurių aukščio ir pločio santykis $0,6 \div 1$, atsiranda plyšių. Plyšių atsiradimas ir plotis fiksuoti mikroskopu, kuris padidino juos 24 kartus. Kai bandinių aukštis mažesnis kaip 50 cm, ardantys kūgiai po abiem apkrovimo aikštelėmis susilieja. Gaunama keturkampė figūra yra artima prizmei. Ardancio kūgio pagrindo matmenys dažniausiai atitinka apkrovimo aikštelės matmenis. Kūgio sudaromosios pasvirusios $60\text{--}70^\circ$ kampu į pagrindo plokštumą. Kūgio aukštis priklausė nuo apkrovimo aikštelės dydžio ir buvo nuo 6 iki 18 cm.

Eksperimentiniai tyrimai parodė, kad glemžiamų betoninių elementų suirimą galima apibūdinti dviem apkrovimo pakopomis:

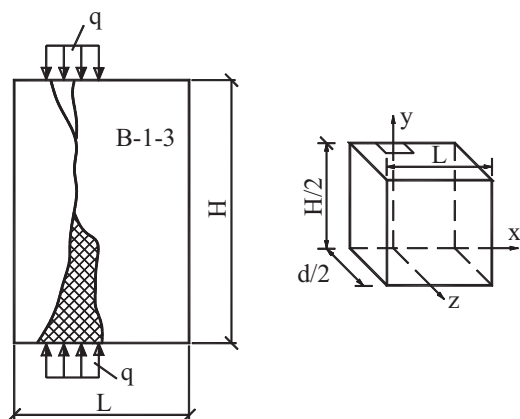
1. Pirmą ardančios apkrovos dalį sudaro jėga, reikalinga ardančiam kūgiui po apkrovimo aikštele susidaryti. Kai bandinių aukštis mažas ($30 \div 50$ cm), atsiranda plyšių.
2. Kitą ardančios apkrovos dalį sudaro jėga, kuri perskelia bandinį vertikaliais pjūviais. Kai bandinių aukščio ir pločio santykis 1,5, plyšių dažniausiai neatsiranda, bandinio perskėlimas įvyksta staiga.

Eksperimentinių tyrimų metu tenzorezistoriais buvo matuojamos išilginės ir skersinės deformacijos. Pagal gautus duomenis sudaryta deformacijų išsklotinė (žr. 2 pav.). Vidutinės deformacijų reikšmės apkrovimo linijose pateiktos 1 lentelėje.

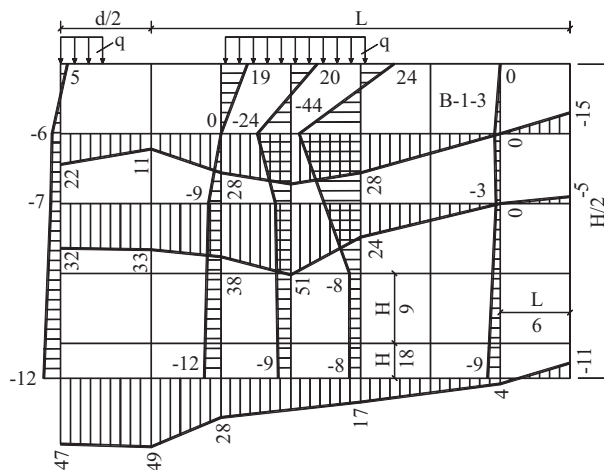
Didžiausios deformacijų reikšmės gautos ties apkrovimo aikštelėmis. Kitame bandinio gale deformacijų reikšmės nežymios, dažniausiai tai tempimo deformacijos. Esant bandinio storiui $d = 0,4 L$ (pločio), žymiai padidėja šoninės deformacijos. Deformacijų dydžiai padidėja, kai įtempimų-deformacijų zonos persidengia.

Autorių atlikti eksperimentiniai-teoriniai tyrimai leidžia sudaryti skaičiavimo modelį, kuris paremtas tokiomis prielaidomis:

1. Po apkrovimo aikštele atsiranda žymių vertikalių normalinių gniuždymo įtempimų. Betonai čia sutankėja, susidaro betoną ardantis kūgis. Šis apspaus tas kūgis suardo betoninį elementą vertikaliais pjūviais (žr. 1 pav.):



1 pav. Glemžiamo betoninio elemento suirimo pobūdis ir priimta koordinatų sistema



2 pav. Vertikalių ir horizontalių eksperimentinių deformacijų išklotinė (kai $\beta = H : L = 1,5$ ir $d:L = 0,4$). Padauginę pateiktus skaičius iš 10^{-5} , gausime santykinų linijinių deformacijų reikšmes

2. Betono apkaba, apspausdama ardantį kūgį, padidina jo atsparumą gniuždymui. Betono apkaba suyra, kai didžiausi tempimo įtempiai viršija betono stiprio tempimui ribines reikšmes. Šie įtempiai tolygiai pasiskirsto vertikaliuose pjūviuose.

1 lentelė. Glemžiamų betoninių elementų vidutinės vertikalios deformacijos

H / L	d / L	Bandinio šifras	Aprova	Vidutinė vertikali deformacija $\epsilon_y \cdot 10^5$, elemento šonuose, kai:		
				x = -L/3, z = 0	x = 0, z = ±d/2	x = 2/3L, z = 0
0,6	0,4	B-1-1	0,5 N _{cre}	-1,0	6,25	-0,5
			N _{cre}	-8,5	25,75	-2,5
1,0	0,4	B-1-2	0,5 N _{cre}	7,5	20,25	-3,0
			N _{cre}	15,0	35,0	-5,5
1,5	0,4	B-1-3	0,5 N _{cre}	23,5	17,25	-2,5
			N _{cre}	51,0	33,5	-5,0
0,6	0,8	B-1-4	0,5 N _{cre}	3,0	-2,0	-2,0
			N _{cre}	6,0	-7,5	-2,5
1,0	0,8	B-1-5	0,5 N _{cre}	5,0	1,25	9,0
			N _{cre}	24,0	7,5	-2,0
1,5	0,8	B-1-6	0,5 N _{cre}	14,0	13,5	-0,5
			N _{cre}	26,5	19,75	-0,5
0,6	1,2	B-1-7	0,5 N _{cre}	-0,5	2,0	-1,0
			N _{cre}	-0,5	-3,0	-0,5
1,0	1,2	B-1-8	0,5 N _{cre}	5,5	-3,5	0
			N _{cre}	19,0	-4,0	0
1,5	1,2	B-1-9	0,5 N _{cre}	11,0	1,5	0
			N _{cre}	22,5	6,5	0,5

Pastaba: N_{cre} – plyšio atsiradimo aprova.

Skaiciuojamosios formulės išvestos vadovaujantis G. Genijevo betono stiprumo teorija [4]. Betono stiprumo sąlyga pagal G. Genijevą yra tokia:

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1) - (f_c - f_{ct})(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) - f_c f_{ct} = 0. \quad (1)$$

Kai glemžiamas elementas apkrautas centriškai, tada ardantis kūgis iš visų pusių apspausdintas

vienodai. Todėl:

$$\sigma_2 = \sigma_3.$$

Betono stiprumo sąlyga pagal G. Genijevą bus tokia:

$$\sigma_1^2 - 2\sigma_1[\sigma_2 + 0,5(f_c - f_{ct})] - [2\sigma_2(f_c - f_{ct}) + f_c f_{ct} - \sigma_2^2] = 0. \quad (2)$$

Į šią lygtį įvedame tokius pažymėjimus:

$$\frac{\sigma_1}{f_c} = \gamma, \quad \frac{\sigma_2}{f_c} = m, \quad \frac{f_{ct}}{f_c} = k, \quad (3)$$

čia $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – svarbiausi įtempimai (σ_1 – didžiausias svarbiausias gniuždymo įtempis), y – vietinio gniuždymo koeficientas, m – ardančio kūgio apspaudimo koeficientas, k – betono tūsumo koeficientas, f_c, f_{ct} – betono stipris stipriai gniuždam ir tempiant.

Įrašę (3) išraišką į kvadratinę lygtį (2) ir atmetę neigiamą šaknį gauname vietinio gniuždymo koeficiento γ išraišką:

$$\gamma = m + 0,5(1 - k) + \sqrt{3m(1 - k) + 0,25(1 + k)^2}. \quad (4)$$

Teoriniai tyrimai [4] ir autorių eksperimentinių duomenų analizė parodė, kad betono stipris tempiant esant glemžimui yra nepastovus. Jis kinta nuo f_{ct} , esant erdviniam įtempių būviui iki padidintos reikšmės f_{ct}^1 (įtempių būvis plokščia deformacija).

Nustatysime santykinę jėgą m , kuria apkaba apspaudžia ardančią kūgį. Pagal G. Genijevą [4] ir antrą autorių pateiktą prielaidą, esant erdviniam įtempių būviui, užrašome:

$$m = k \left(\sqrt{\frac{A}{A_p}} - 1 \right). \quad (5)$$

$$\gamma = 0,5(1 + m + \eta m - k) + \sqrt{0,25(1 + m + \eta m - k)^2 - (\eta - 1 - \eta^2)m^2 + m(1 + \eta)(1 - k) + k}. \quad (9)$$

Ekscentriškai apkrautiems elementams koeficientas γ nustatomas interpoliuojant koeficientų reikšmes, gautas esant centriškam ir šoniniam apkrovimui.

Eksperimentiniuose tyrimuose bandinių aukščio ir pločio santykis $\beta = H / L$ keitėsi nuo 0,6 iki 1,5.

Mažėjant šiam santykiui įtempių koncentracijos zonos persidengia, atlaikymo galia mažėja tiesiškai. Atlaikymo galios mažėjimas įvertinamas pagal autorių eksperimentinius duomenis tokia lygtimi:

$$\gamma_1 = y + (\beta - 1,5)t\alpha \quad (11)$$

čia: $t\alpha$ – tiesės pasvirimo kampas, nustatomas iš eksperimentinių duomenų mažiausių kvadratų metodu.

Bandinių matmenys, betono stipriai tempimui

Kai santykis $A / A_p = 15$, betono stipris tempiant atitinka reikšmę, kai įtempių būvis plokščia deformacija (A – elemento plotas, A_p – apkrovimo aikštelės plotas). Šiam santykiui kintant nuo 15 iki 60 betono stipris tempiant padidėja iki 1,5 karto [4]. Toliau galime užrašyti:

$$f_{ct}^1 = n f_{ct} = n \left[(f_c - f_{ct}) - \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{f_c^2 - f_c f_{ct} + f_{ct}^2} \right], \quad (6)$$

čia: $n = 1 \div 1,5$ – betono stiprio tempiant padidėjimo koeficientas (kinta proporcingai santykiui A / A_p).

Esant plokščiai deformacijai, santykinė jėga m , kuria apkaba apspaudžia ardančią kūgį, nustatoma taip:

$$m = n \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{1 - k + k^2} - 1 + k \right) \left(\sqrt{\frac{A}{A_p}} - 1 \right). \quad (7)$$

Kai santykis $A / A_p > 60$, (6) ir (7) formulėse esantis koeficientas n nuosekliai mažėja iki 1. Kai santykis $A / A_p \leq 1,5$, praktiniams skaičiavimams galima taikyti $n = 1$.

Esant nesimetriniam apkrovimui, betono apkaba nevienodai apspaudžia ardančią kūgį. Tada:

$$\sigma_3 = \eta \sigma_2 \quad (8)$$

čia $0 \leq \eta < 1$.

Išsprendę betono stiprio kvadratinę lygtį (4), gauname:

ir gniuždymui bei gauti rezultatai pateikti 2 lentelėje.

Iš 2 lentelės matome, kad glemžiamų elementų teorinė ir eksperimentinė atlaikymo galia skiriasi nuo -14 iki 10,2 proc.

Trapių medžiagų stiprumui nustatyti naudosi-
me maksimalių linijinių deformacijų hipotezę. Šiuo atveju σ_1 yra didžiausias svarbiausias tempimo įtempis. Tuomet vietinio gniuždymo koeficientas

$$\gamma = \frac{\sigma_3}{f_c}. \quad (12)$$

Nustatysime vietinio gniuždymo koeficiento išraišką iš maksimalių linijinių deformacijų hipotezės:

$$\sigma_1 - \nu (\sigma_2 + \sigma_3) = f_{ct},$$

2 lentelė. *Glemžiamų betoninių elementų atlaikymo galios eksperimentinės ir teorinės reikšmės*

Nr.	Bandinio šifras	Matmenys H × L × D, cm	Betono stipris, Mpa		Eksperimentinė apkrova, kN		Pagal siūlomą metodiką	Skirtumas, ± %
			f _c	f _{ct}	pleišėjimo	suirimo		
1	B-1-1	30 × 50 × 20	35,2	2,34	420	480	431	10,2
2	B-1-2	50 × 50 × 20	35,2	2,34	450	550	611	-11,1
3	B-1-3	75 × 50 × 20	35,2	2,34	750	750	835	-11,3
4	B-1-4	30 × 50 × 40	35,2	2,34	500	550	579	-5,3
5	B-1-5	50 × 50 × 40	35,2	2,34	600	718	773	-7,6
6	B-1-6	70 × 50 × 40	35,2	2,34	984	984	1015	3,2
7	B-1-7	30 × 50 × 60	35,2	2,34	500	579	618	-6,7
8	B-1-8	30 × 50 × 60	35,2	2,34	700	800	850	-6,3
9	B-1-9	75 × 50 × 60	35,2	2,34	1100	1100	1141	-3,7
10	B-1-10	30 × 50 × 40	35,2	2,34	900	1030	1119	-8,6
11	B-1-11	50 × 50 × 40	35,2	2,34	900	1100	1254	-14,0
12	B-1-12	75 × 50 × 40	35,2	2,34	1300	1300	1423	-9,5
13	B-1-13	30 × 50 × 60	35,2	2,34	1610	1630	1737	-6,6
14	B-1-14	50 × 50 × 60	35,2	2,34	1920	1940	1858	4,2
15	B-1-15	75 × 50 × 60	35,2	2,34	2150	2150	2009	6,6

Įvedę santykinius dydžius, gauname:

$$m - \nu m - \nu \gamma = k,$$

$$\gamma = \frac{(1 - \nu)m - k}{\nu} \quad (13)$$

čia: ν – Puasono koeficientas.

Šioje lygtyje m reiškia santykinę apspaudimo jėgą, o k – medžiagos tąsumo koeficientą.

Išvados

1. Eksperimentiniai betono glemžimo tyrimai parodė, kad po apkrovimo aikštele atsiranda žymių vertikalųjų gniuždymo įtempimų. Sutankėjęs betonas sudaro ardančią kūgį, kuris perskelia betono apkabą, esančią šalia apkrovimo aikštelės.
2. Kai glemžiamų elementų apkrovimo aikštelės ir plotų santykis yra ne daugiau kaip 15, įtempimų būvis yra erdvinis. Kai šis santykis 15÷50, įtempimų būvis – plokščia deformacija. Kai santykis didesnis – elementas neperskeliamas, o apkrovimo aikštelė įspaudžiama į betoną. Vietinio gniuždymo koeficiento γ reikšmės kinta keičiantis įtempimų būvims.
3. Remiantis eksperimentinių ir teorinių tyrimų analize, pasiūlyta trapių medžiagų skaičiavimo metodika pagal stiprumo teorijas. Ši metodika leidžia įvertinti glemžiamų elementų matmenis ir medžiagos stiprius tempiant bei gniuždant.
4. Teorinės ir eksperimentinės glemžiamų betoni-

nių elementų atlaikymo galios skiriasi nuo –14 iki 10,2 proc. Tyrimai rodo, kad bandinio aukščiui mažėjant, mažėja ir jų atlaikymo galia glemžimui. Pasiūlyta eksperimentinė – teorinė lygtis atlaikymo galios mažėjimui įvertinti. Tolimesnis eksperimentinių duomenų apdorojimas leistų siūlomą skaičiavimo metodiką patikslinti.

Literatūra

1. Холмянский М. М., 1997, *Бетон и железобетон (деформативность и прочность)*. Москва: Стройиздат.
2. Michnevič E., Belevičius R., 2000, Elementas DKT_CST sluoksniuotų anizotropinių plokštelių analizei. *Statyba: Mokslo žurnalai / VGTU*, Nr. 5 VI tomas. P. 351–356.
3. Šleževičius K., Roličius J., Pelikša M., Mikuckis F., 2003, Įtempimų būvis nedidelėmis aikštelėmis gniuždomose sienutėse. *VAGOS. Mokslo darbai*. Nr. 59 (12). P. 125–130.
4. Гениев Г. А., 1974, *Теория пластичности бетона и железобетона*. ЦНИИСК. М.: Стройиздат.
5. Niyogi S., 1973, Bearing strength of concrete – geometric variations. *Proc. ASCE Journal of Structural Division*. V. 99, №ST7.
6. Žiliukas A., 2006, *Stiprumo ir irimo kriterijai*. Kaunas: Technologija.
7. Филин А. П., 1975, *Прикладная механика твердого деформируемого тела (Сопротивление материалов с элементами теории сплошных сред и строительной механики)*. М.: Наука.

CALCULATION OF STRENGTH OF SPATIAL CONCRETE MEMBERS EXPOSED TO BEARING STRESS

Linas Vasiliauskas, Kazys Šleževičius, Jonas Roličius, Antanas Špokas

Summary

Concentration of stresses and deformations occurs in bearing members of massive structures, distribution units. In such cases, external load is transferred by small areas. As building materials of greater strength come into use and clear spans in building structures are increasing, concentration of stresses and deformations is increasing as well. Characteristically, it comprises intensive compressive stresses as well as considerable tensile and circumferential stresses. Concentration of stresses is one of the factors affecting strength, rigidity, reliability and durability of constructions.

Methods of calculating the strength of brittle materials are presented in the article. The methods are based on experimental and theoretical research. The research shows that under loaded area, the intensity of normal compressive stresses increases. The increase in stresses causes concrete ramming (consolidation) and under loaded area a breaking cone forms. The cone splits the member in vertical sections. When the member is exposed to bearing stress, the material lying near the loaded area surrounds and compresses the breaking cone thus increasing the resistance of the loaded area to compression. The casing fails when maximal tensile stresses in it reach the strength of material under tension. By methods presented here, failure of material in members exposed to bearing stress as well as the influence of the casing are established according to strength theories.

The methods applied enable to evaluate not only dimensions of the member but also physical and mechanical properties of materials. In design specifications both section characteristics and strength of materials under tension and compression are taken into consideration.

Keywords: bearing stress, concrete, strength theories, stress behaviour, brittle materials.

GLEMŽIAMŲ ERDVINIŲ BETONINIŲ ELEMENTŲ SKAIČIAVIMAS

Linas Vasiliauskas, Kazys Šleževičius, Jonas Roličius, Antanas Špokas

Santrauka

Įtempių-deformacijų koncentracija pasireiškia masyvių konstrukcijų atraminėse dalyse, paskirstomuose įrenginiuose. Šiais atvejais išorinė apkrova perduodama nedidelėmis aikštelėmis. Didėjant statybinių konstrukcijų angoms, naudojant didesnio stiprumo medžiagas, didėja ir įtempių-deformacijų koncentracija. Jai būdingi ne tik dideli gniuždantys, bet ir žymūs tempimo bei tangentiniai įtempiai. Įtempių koncentracija turi įtakos konstrukcijų stiprumui, standumui, patikimumui ir ilgaamžiškumui.

Straipsnyje pateikiama glemžiamų trapių medžiagų skaičiavimo metodika. Ji paremta eksperimentiniais-teoriniais tyrimais. Tyrimai rodo, kad po apkrovimo aikštele padidėja normaliniai gniuždantys įtempiai. Šie įtempiai sutankina betoną ir sudaro po apkrovimo aikštele ardantį kūgį. Kūgis perskelia elementą vertikaliais pjūviais. Kai elementas glemžiamas, šalia apkrovimo aikštelės esanti medžiaga apspaudžia ardantį kūgį ir padidina jos pasipriešinimą gniuždymui. Apkaba suyra, kai didžiausi tempimo įtempiai joje pasiekia medžiagos stiprį tempiant. Medžiagos suirimas glemžiamuose elementuose ir apkabos įtaka pateiktoje metodikoje nustatomi pagal stiprumo teorijas.

Metodika įvertina ne tik elemento matmenis, bet ir medžiagų fizines-mechanines savybes. Projektavimo normos be pjūvio charakteristikų įvertina medžiagos stiprį tempiant ir gniuždant. Pagal pateiktą metodiką galima įvertinti medžiagos stiprius tempiant bei gniuždant.

Prasminiai žodžiai: glemžimas, betonas, stiprumo teorijos, įtempių būvis, trapios medžiagos.

Įteikta 2010-09-02