

DOI: 10.32347/2786-7269.2024.10.417-426

УДК 624.04

д.т.н., професор **Сур'янінов М.Г.**,
sng@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0003-2592-5221,
к.т.н., доцент **Неутов С.П.**,
neutov.stepan@ogasa.org.ua, ORCID: 0000-0002-0132-124X,
Метлицький В.В.,
metlizkiy98@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1668-9936,
Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса

ПІДВИЩЕННЯ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБОЛОНОК ШЛЯХОМ ДОДАТКОВОГО ДИСПЕРСНОГО АРМУВАННЯ

Розглянуто результати експериментальних досліджень довгих циліндричних оболонок з метою оцінки тріщиноутворення залізобетонної циліндричної оболонки при її додатковому дисперсному армуванні. Розроблена конструкція випробувального стенду дозволяє передавати на оболонку вертикальне навантаження, рівномірно розподілене за чотирма смугами, які перебували на рівній відстані одна від одної. Виготовлено та досліджено 4 моделі циліндричної оболонки із залізобетону (зразки RC1-RC4) та 4 моделі циліндричної оболонки із фібробетону (зразки FRC1-FRC4). Товщина зразків становила 45, 50, 55, 60 мм, а розміри поперечного перерізу бортових елементів змінювалися відповідним чином. Розподілене навантаження (вертикальне) було прикладено по чотирьох смугах, шириною 13 см кожна, і лише тілом оболонки, тобто бортові елементи не навантажені. Оболонка шарнірно спирається з кутів на пластини 100x100мм. У кожну з трьох зон, розташованих між ланцюгами навантаження, закріплені по 4 індикатори годинного типу. Крім індикаторів, на оболонку наклеєні тензометричні датчики, за допомогою яких відстежувалися деформації на верхній та нижній поверхнях. Побудовано графіки залежності відносної деформації від навантаження. Визначено несучу здатність оболонок та навантаження, при якому утворилася перша тріщина. До моменту втрати несучої здатності у всіх оболонках утворилися тріщини з однаковою початковою шириною розкриття 0,05 мм. Кінцева ширина розкриття тріщин, як і несуча здатність, децю зростала за умови зростання товщини оболонки. Навантаження початку тріщиноутворення виявилось найбільшим для двох середніх значень товщини оболонки – 50 та 55 мм. Загальна картина тріщиноутворення всіх зразків майже однакова.

Ключові слова: залізобетон; експеримент; циліндрична оболонка; фібра; тріщиноутворення.

Вступ. Одним із актуальних шляхів розвитку техніки є все ширше застосування легких та економічних тонкостінних конструкцій. Сучасне будівництво, безумовно, вимагає нових ефективних матеріалів. Одним із них є сталеві фібробетон, який дозволяє покращити такі характеристики бетону, як тріщиностійкість, морозостійкість, міцність на розтяг, вигин, кручення та ін. Застосування фібри дозволяє змінити характер процесу руйнування. На відміну від звичайного бетону, в якому цей процес відбувається практично миттєво, у фібробетоні не відбувається крихкого руйнування, і конструкція продовжує чинити опір навантаженню, а характер руйнування змінюється з крихкого на в'язкий.

Аналіз попередніх досліджень. Для аналізу роботи циліндричних оболонок рекомендувалося кілька способів. Якщо відношення довжини оболонки до найменшого розміру перевищує поперечного 4, можуть використовуватися спрощені рівняння, виведені Шорером [1]; Найбільш повна система рівнянь, що потребує великої обчислювальної роботи, була сформульована Дженкінс [2].

Основні аналітичні методи аналізу роботи довгих циліндричних оболонок розроблені у минулому столітті, і відтоді не набули суттєвого розвитку. Це безмоментна та моментна теорії оболонок, напівбезмоментна теорія В.З. Власова [3], теорія криволінійних пластинок В.В. Новожилова [4], теорія пологих оболонок Муштар - Доннелла - Власова, ітераційні теорії А.Л. Гольденвейзера [5] та С.А. Амбарцумяна [6] та деякі інші, менш значущі [7, 8]. Найбільш повний огляд робіт з аналітичних методів розрахунку довгих циліндричних оболонок представлений у [9]. І хоча минуло майже п'ятдесят років, цей огляд не втратив своєї актуальності, оскільки за цей період не з'явилися нові аналітичні рішення. Зазначимо низку сучасних досліджень, насамперед, експериментальних. У роботі [10] оцінювалася кільцева деформація тонкостінних циліндричних оболонок із фіброцементного композиту при рівномірному внутрішньому гідростатичному навантаженні. Показники зручності та осадки бетону, виготовленого з додаванням сталевих відходів різних токарних верстатів, досліджені в [11]. Питання міцності та тріщиностійкості залізобетонних циліндричних оболонок давно привертають увагу вчених [12]. Цей інтерес не слабшає і зараз. Відмітимо роботи [13-16].

Аналіз літератури показує, що у сучасних дослідженнях циліндричних оболонок переважають роботи, пов'язані з стійкістю. Експериментальним дослідженням залізобетонних та сталеві фібробетонних циліндричних оболонок приділяється дуже мало уваги, тому цей напрямок є досить актуальним.

Мета. Метою роботи було дослідження тріщиноутворення залізобетонної циліндричної оболонки при її додатковому дисперсному армуванні.

Матеріали та методи дослідження. Матеріал досліджуваної оболонки — залізобетон з додатковим дисперсним армуванням. Використовуються методи будівельної механіки, статистичного аналізу та експериментальні методи. Для виготовлення зразків матеріалу під час замішування бетонної маси рівномірно додавалася фібра, загальний обсяг якої становив 1% від самого виробу. Визначення властивостей матеріалу проводилися на призмах і кубах, розмірами 100x100x400 мм і 100x100x100 мм відповідно, витриманих 28 доби. Призми і куби виготовлені згідно з нормативними документами.

Результати та обговорення.

Конструкція випробувального стенду [17] (рис. 1) дозволяє передавати на оболонку вертикальне навантаження, рівномірно розподілене за чотири смуги, які перебували на рівній відстані одна від одної.

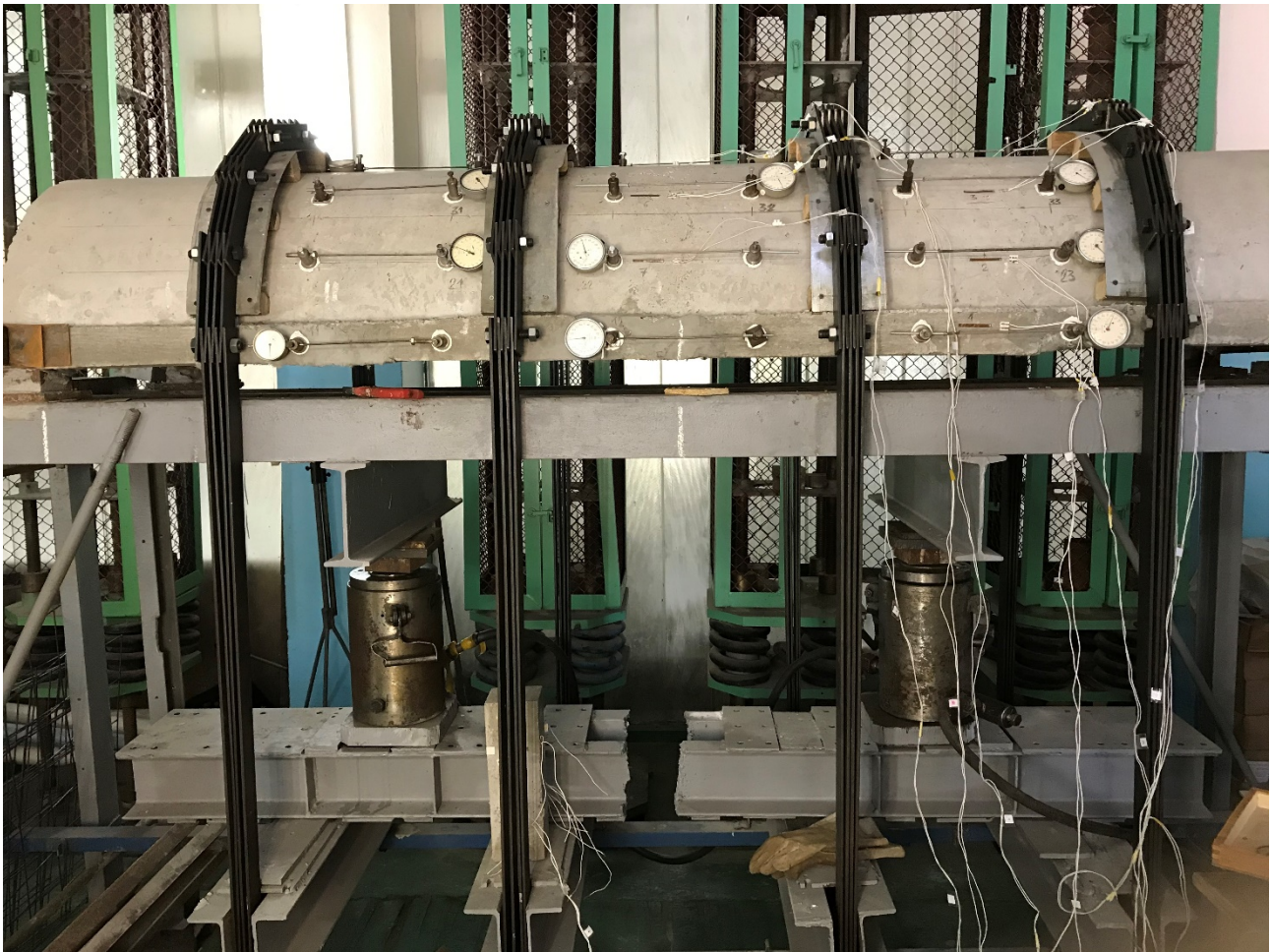


Рис. 1. Випробувальний стенд оболонки

В процесі випробувань визначалася несуча здатність оболонки та відстежувався процес тріщиноутворення, а всі етапи навантаження (яке здійснювалося поступово) фіксувалися індикаторами.

З метою отримання повної та достовірної картини деформації поверхні оболонки у кожному з трьох зон, розташованих між ланцюгами навантаження, закріплені по 4 індикатори годинного типу з ціною поділу 0,01мм. Три індикатори (перший, п'ятий та дев'ятий) закріплені на бортовому елементі оболонки. Кожен четвертий з дванадцяти — на гребені оболонки. Два середні індикатори з кожної четвірки (2 і 3; 6 і 7; 10 і 11) розташовані на рівнях 1/3 і 2/3 стріли підйому оболонки відповідно (рис. 2).

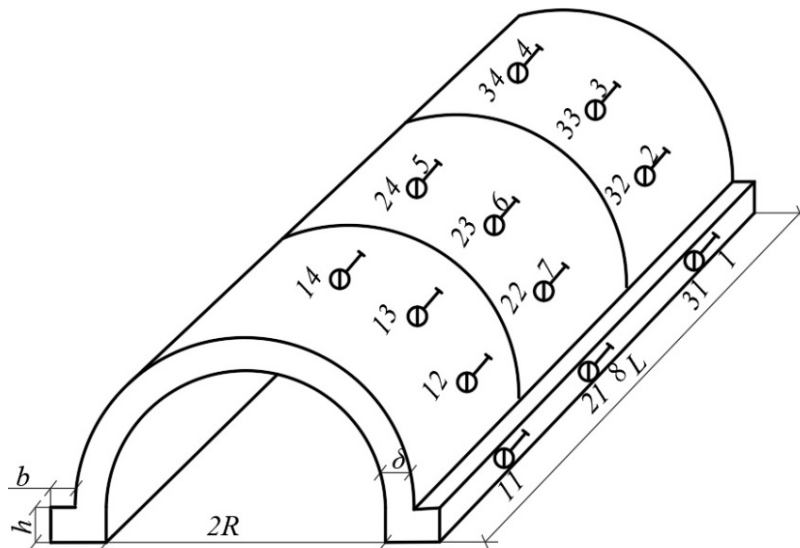


Рис. 2. Розташування вимірювальних приладів

Крім індикаторів, на оболонку наклеєні тензометричні датчики, за допомогою яких відстежувалися деформації на верхній та нижній поверхнях. Процес навантаження закінчувався тоді, коли випробувана оболонка втрачала здатність чинити опір зовнішньому навантаженню. Величина навантаження, що відповідає цьому моменту, бралася за несучу здатність оболонки.

Відповідно до програми випробувань циліндричних оболонок у рамках науково-дослідної роботи "Аналітичні, комп'ютерні та експериментальні дослідження напружено-деформованого стану фібробетонних конструкцій" (реєстраційний номер 0121U111755) на кафедрі будівельної механіки Одеської державної академії будівництва та архітектури виготовлено 4 моделі циліндричної оболонки із залізобетону (зразки RC1-RC4) та 4 моделі із фібробетону (зразки FRC1-FRC4).

Всі зразки-оболонки мали постійну довжину $L = 2450\text{мм}$ та радіус поперечного перерізу $R = 270\text{мм}$, а варіювалися товщина оболонки δ та розміри поперечного перерізу бортових елементів b , h .

Товщина зразків (табл. 1) становила 45, 50, 55, 60 мм, а розміри поперечного перерізу бортових елементів змінювалися відповідним чином.

Розподілене навантаження (вертикальне) було прикладено по чотирьох смугах, шириною 13 см кожна, і лише тілом оболонки, тобто. бортові елементи не навантажені. Оболонка шарнірно спирається з кутів на пластини 100x100мм.

Несуча здатність бетонних оболонок та навантаження, при якому утворилася перша тріщина, наведена у табл. 1. Початкова ширина розкриття тріщин виявилася однаковою — 0,05 мм. Кінцева ширина розкриття тріщин наведена у табл. 2.

Таблиця 1

Несуча здатність та навантаження на початку тріщиноутворення

Модель	Товщина, мм	Несуча здатність, кН	Навантаження початку тріщиноутворення, кН	Відсоток від несучої здатності
RC1	45	96,4	42,9	44,5
RC2	50	101,6	64,5	63,5
RC3	55	109,6	64,5	58,9
RC4	60	117,9	53,6	45,5
FRC1	45	128,6	64,3	50,0
FRC2	50	149,9	74,9	50,0
FRC3	55	167,6	80,6	48,1
FRC4	60	182,2	104,8	57,5

На рис. 3 показано загальну картину тріщиноутворення у бетонних зразках.

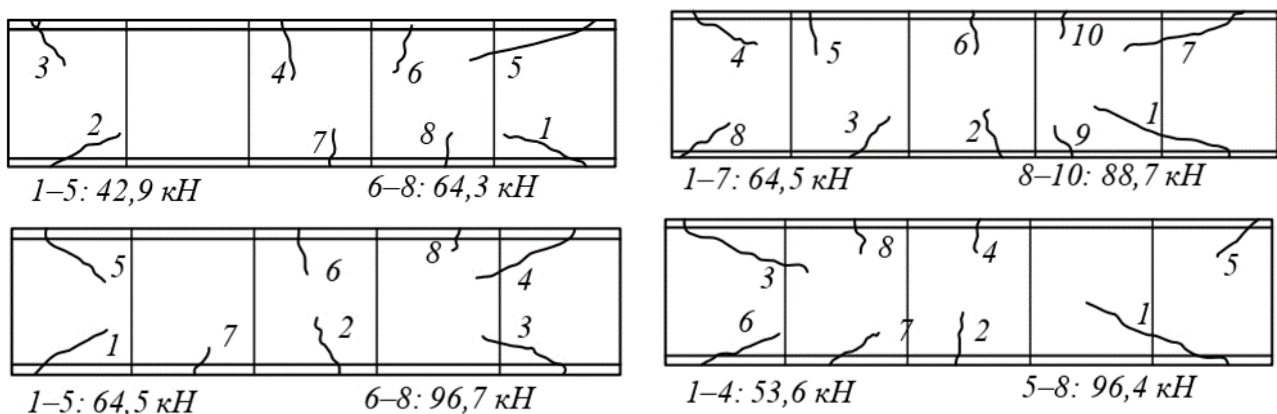


Рис. 3. Тріщиноутворення у зразках оболонки RC1, RC2, RC3, RC4

Несуча здатність фібробетонних оболонок та навантаження, при якому утворилася перша тріщина, наведена у табл. 1. Початкова ширина розкриття тріщин виявилася однаковою — 0,05 мм. Кінцева ширина розкриття тріщин наведена у табл. 3.

Таблиця 2

Кінцева ширина розкриття тріщин бетонних зразків

Номер тріщини				Навантаження, кН				Кінцева ширина розкриття, мм			
RC1	RC2	RC3	RC4	RC1	RC2	RC3	RC4	RC1	RC2	RC3	RC4
1	1	1	1	42,9	64,5	64,5	53,6	0,5	0,5	0,4	0,5
2	2	2	2	42,9	64,5	64,5	53,6	0,4	0,7	0,7	0,8
3	3	3	3	42,9	64,5	64,5	53,6	0,3	0,1	0,4	0,6
4	4	4	4	42,9	64,5	64,5	53,6	0,8	0,4	0,6	0,6
5	5	5	5	42,9	64,5	64,5	96,4	0,5	0,05	0,4	0,3
6	6	6	6	64,3	64,5	96,7	96,4	0,1	0,6	0,7	0,4
7	7	7	7	64,3	64,5	96,7	96,4	0,7	0,7	0,05	0,1
8	8	8	8	64,3	88,7	96,7	96,4	0,05	0,3	0,1	0,1
	9				88,7				0,05		
	10				88,7				0,05		

Таблиця 3

Кінцева ширина розкриття тріщин фібробетонних зразків

Номер тріщини				Навантаження, кН				Кінцева ширина розкриття, мм			
FRC1	FRC2	FRC3	FRC4	FRC1	FRC2	FRC3	FRC4	FRC1	FRC2	FRC3	FRC4
1	1	1	1	21,4	21,4	24,2	24,2	0,3	0,3	0,4	0,3
2	2	2	2	42,9	42,9	40,3	40,3	0,3	0,5	0,05	0,6
3	3	3	3	53,6	53,6	56,4	56,4	0,2	0,3	0,6	0,3
4	4	4	4	64,3	64,3	72,5	72,5	0,7	0,5	0,2	0,2
5	5	5	5	74,9	74,9	80,6	88,7	0,05	0,2	0,05	0,2
6	6	6	6	85,8	85,8	88,7	104,8	0,05	0,1	0,1	0,05
7	7	7	7	96,4	96,4	104,8	120,9	0,5	0,2	0,05	0,5
8	8	8	8	107,1	107,1	120,9	137,0	0,2	0,05	0,05	0,05
9	9	9	9	117,8	117,8	137,0	153,1	0,1	0,05	0,3	0,05
10	10	10	10	128,6	128,6	153,1	169,3	0,05	0,05	0,1	0,05
	11	11			139,3	161,2	177,3		0,05	0,2	
	12	12			149,9	167,6	182,2		0,1	0,2	

На рис. 4 показано картину тріщиноутворення у фібробетонних зразках.

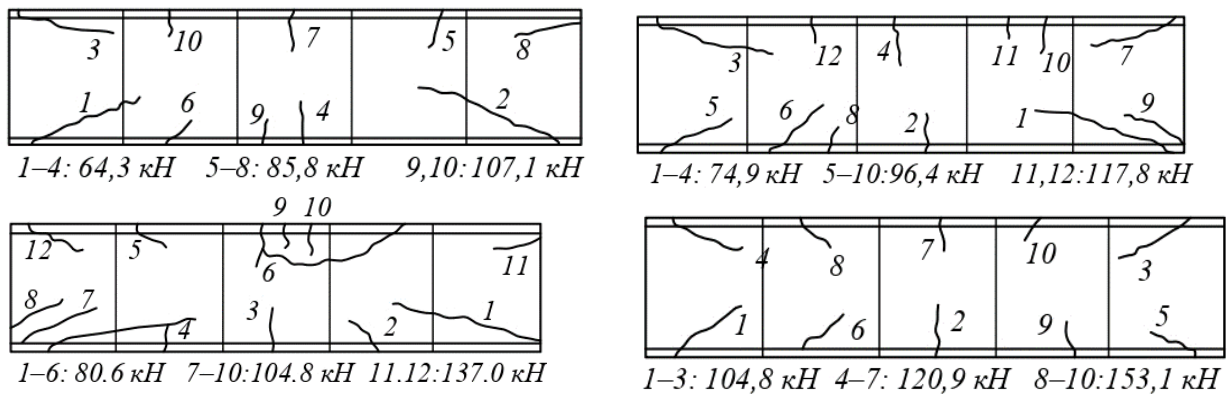


Рис. 4. Тріщиноутворення у зразках оболонки FRC1, FRC2, FRC3, FRC4

Висновки

Таким чином, розглянуто результати експериментальних досліджень довгих циліндричних оболонок з метою оцінки тріщиноутворення залізобетонної циліндричної оболонки при її додатковому дисперсному армуванні. Виготовлено та досліджено 4 моделі циліндричної оболонки із залізобетону (зразки RC1-RC4) та 4 моделі циліндричної оболонки із фібробетону (зразки FRC1-FRC4). Товщина зразків становила 45, 50, 55, 60 мм, а розміри поперечного перерізу бортових елементів змінювалися відповідним чином. Розподілене навантаження (вертикальне) було прикладено по чотирьох смугах, шириною 13 см кожна, і лише тілом оболонки, тобто бортові елементи не навантажені. Оболонка шарнірно спирається з кутів на пластини 100x100мм. У кожному з трьох зон, розташованих між ланцюгами навантаження, закріплені по 4 індикатори годинного типу. Крім індикаторів, на оболонку наклеєні тензометричні датчики, за допомогою яких відстежувалися деформації на верхній та нижній поверхнях. Побудовано графіки залежності відносної деформації від навантаження. Визначено несучу здатність оболонок та навантаження, при якому утворилася перша тріщина. До моменту втрати несучої здатності у всіх оболонках утворилися тріщини з однаковою початковою шириною розкриття 0,05 мм. Кінцева ширина розкриття тріщин, як і несуча здатність, дещо зростала за умови зростання товщини оболонки. Навантаження початку тріщиноутворення виявилось найбільшим для двох середніх значень товщини оболонки – 50 та 55 мм. Загальна картина тріщиноутворення всіх зразків майже однакова.

Список літератури

1. Schorer, H. (1935): Line load action on thin cylindrical shells, P r o c . ASCE, p. 281.
2. Jenkins, R.S. (1947): 'Theory and Design of Cylindrical Shell Structures' O. V. Arup, London.

3. Власов В.З. Общая теория оболочек и её приложения в технике [Текст] / В.З. Власов. – М. Л.: Гостехтеориздат, 1949. 784 с.
4. Новожилов, В.В. Теория тонких оболочек [Текст] / В.В. Новожилов. Изд. 2-е. Л.: Гос. союз. изд-во судостр. промышленности, 1962. 431 с.
5. Гольденвейзер, А.Л. Теория тонких упругих оболочек [Текст] / А.Л. Гольденвейзер. Изд. 2-е. М.: Наука, 1976. 512 с.
6. Амбарцумян С.А. Общая теория анизотропных оболочек. М., 1974. 446 с.
7. Reissner, E. On consistent first approximations in the general theory of thin elastic shells [Text] / E. Reissner // *Ingenieur-Archive*. Springer-Verlag, 1971. № 40. P. 402 – 419.
8. Тонкостенные оболочечные конструкции [Текст]: пер. с англ. / А. Арбош, Г.В. Бабель [и др.]; под ред. Э.И. Григолюка. М.: Машиностроение, 1980. 607 с.
9. Жигалко Ю.П. Расчет тонких упругих цилиндрических оболочек на локальные нагрузки. Иссл. по теор. пластин и оболочек, 1966, выпуск 4, 3–41.
10. Ghasemzadeh, Hosein & Saradar, Ashkan & Tahmouresi, Behzad. (2018). Hoop Stress-Strain in Fiber-Reinforced Cementitious Composite Thin-Walled Cylindrical Shells. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 30. 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002428.
11. Çelik A.İ., Özkılıç Y.O., Zeybek Ö., Özdöner N., Tayeh B.A. Performance Assessment of Fiber-Reinforced Concrete Produced with Waste Lathe Fibers. *Sustainability*. 2022; 14(19):11817. <https://doi.org/10.3390/su141911817>
12. Кан С.Н., Каплан Ю.И., Розраунок циліндричних оболонок покриттів будівель. Видавництво: Вища школа, 1973. 244 с.
13. Tanaka, Masafumi & Mashita, Kazuhiko. (2010). Retrofitted strength of concrete cylindrical shells reinforced with single layer under concentrated load. *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*. 75. 1681-1689. 10.3130/aajs.75.1681.
14. Karpov, V. & Semenov, A. (2013). Mathematical model of deformation of orthotropic reinforced shells of revolution. *Magazine of Civil Engineering*. 40. 100-106. 10.5862/MCE.40.11.
15. Shen Li, Do Kyun Kim, Qing Quan Liang. Fibre-Based modelling for predicting the progressive collapse of cylindrical shells under combined axial compression and bending moment, *Engineering Structures*, Volume 272, 2022, 114988, doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114988.
16. Rong Li, Meng Yang, Bin Liang. A new and convenient method for strength evaluation of cracked cylindrical shell based on the ratio of crack tip stresses. *Structures*, Volume 52, 2023, Pages 146-157, ISSN 2352-0124, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.03.130>.
17. Патент на корисну модель №148291. Стенд для визначення несучої здатності циліндричної оболонки / Неутов С.П., Корнеєва І.Б., Сур'янінов М.Г., Бойко О.В., Головата З.О. 21.07.2021. <https://sis.ukrpatent.org/uk/search/detail/1606901>.

Doctor of Science, Professor **Mykola Surianinov**,
PhD **Stepan Neutov**,
Postgraduate **Vitalii Metlizkiy**,
Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa

INCREASING THE CRACK RESISTANCE OF CYLINDRICAL SHELLS THROUGH ADDITIONAL DISPERSED REINFORCEMENT

The results of experimental studies of long cylindrical shells are considered in order to assess the cracking of a reinforced concrete cylindrical shell with its additional dispersed reinforcement. The developed design of the test stand allows

transferring a vertical load to the shell, evenly distributed over four strips, which were at an equal distance from each other. 4 models of a cylindrical shell made of reinforced concrete (samples RC1-RC4) and 4 models of a cylindrical shell made of fiber concrete (samples FRC1-FRC4) were manufactured and tested. The thickness of the samples was 45, 50, 55, 60 mm, and the cross-sectional dimensions of the side elements changed accordingly. The distributed load (vertical) was applied over four strips, 13 cm wide each, and only by the shell body, i.e. the side elements were not loaded. The shell is hingedly supported from the corners on 100x100mm plates. In each of the three zones located between the load chains, 4 watch-type indicators are fixed. In addition to the indicators, strain gauges are glued to the shell, with the help of which deformations on the upper and lower surfaces were monitored. Graphs of the dependence of relative deformation on the load were constructed. The bearing capacity of the shells and the load at which the first crack formed were determined. By the time the bearing capacity was lost, cracks with the same initial opening width of 0.05 mm had formed in all shells. The final width of the crack opening, like the bearing capacity, increased slightly with increasing shell thickness. The load at the beginning of crack formation turned out to be the largest for two average values of shell thickness – 50 and 55 mm. The general picture of crack formation of all samples is almost the same.

Keywords: reinforced concrete; experiment; cylindrical shell; fiber; crack formation.

REFERENCES

1. Schorer, H. (1935): Line load action on thin cylindrical shells, *Proc. ASCE*, p. 281. {in English}
2. Jenkins, R.S. (1947): 'Theory and Design of Cylindrical Shell Structures' O. V. Arup, London. {in English}
3. Vlasov V.Z. General Theory of Shells and Its Applications in Engineering [Text] / V.Z. Vlasov. - M.L.: Gostekhteorizdat, 1949. 784 p. {in Russian}
4. Novozhilov, V.V. Theory of Thin Shells [Text] / V.V. Novozhilov. 2nd ed. L.: State Union Publishing House of Shipbuilding Industry, 1962. 431 p. {in Russian}
5. Goldenweiser, A.L. Theory of Thin Elastic Shells [Text] / A.L. Goldenweiser. 2nd ed. M.: Nauka, 1976. 512 p. {in Russian}
6. Ambartsumyan S.A. General Theory of Anisotropic Shells. M. 1974. 446 p. {in Russian}
7. Reissner, E. On consistent first approximations in the general theory of thin elastic shells [Text] / E. Reissner // *Ingenieur-Archive*. Springer-Verlag, 1971. № 40. P. 402 – 419. {in English}

8. Thin-walled shell structures [Text]: trans. from English / A. Arbosh, G.V. Babel [et al.]; edited by E.I. Grigolyuk. Moscow: Mashinostroenie, 1980. 607 p. {in Russian}
9. Zhigalko Yu.P. Calculation of thin elastic cylindrical shells for local loads. Research on the theory of plates and shells, 1966, issue 4, 3–41. {in Russian}
10. Ghasemzadeh, Hosein & Saradar, Ashkan & Tahmouresi, Behzad. (2018). Hoop Stress-Strain in Fiber-Reinforced Cementitious Composite Thin-Walled Cylindrical Shells. Journal of Materials in Civil Engineering. 30. 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002428. {in English}
11. Çelik A.İ., Özkılıç Y.O., Zeybek Ö., Özdöner N., Tayeh B.A. Performance Assessment of Fiber-Reinforced Concrete Produced with Waste Lathe Fibers. Sustainability. 2022; 14(19):11817. <https://doi.org/10.3390/su141911817>. {in English}
12. Kan S.N., Kaplan Yu.I., Restoration of cylindrical shells of budivel coatings. Vidavnitstvo: Vishcha School, 1973. 244 p. {in Ukrainian}
13. Tanaka, Masafumi & Mashita, Kazuhiko. (2010). Retrofitted strength of concrete cylindrical shells reinforced with single layer under concentrated load. Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ). 75. 1681-1689. 10.3130/aijs.75.1681. {in English}
14. Karpov, V. & Semenov, A. (2013). Mathematical model of deformation of orthotropic reinforced shells of revolution. Magazine of Civil Engineering. 40. 100-106. 10.5862/MCE.40.11. {in English}
15. Shen Li, Do Kyun Kim, Qing Quan Liang. Fibre-Based modelling for predicting the progressive collapse of cylindrical shells under combined axial compression and bending moment, Engineering Structures, Volume 272, 2022, 114988, doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114988. {in English}
16. Rong Li, Meng Yang, Bin Liang. A new and convenient method for strength evaluation of cracked cylindrical shell based on the ratio of crack tip stresses. Structures, Volume 52, 2023, Pages 146-157, ISSN 2352-0124, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.03.130>. {in English}
17. Patent for corysna model No. 148291 Stand for identifying the non-particulate structure of a cylindrical shell / S.P. Netutov, I.B. Korneeva, M.G. Surianinov, O.V. Boyko, Z.O. Golovata. 21.07.2021. <https://sis.ukrpatent.org/uk/search/detail/1606901>. {in Ukrainian}