DOI: 10.34031/2618-7183-2021-4-4-41-48

*Трекин Н.Н. *, доктор технических наук, профессор,
Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет, Россия,
Саркисов Д.Ю., кандидат технических наук, доцент,
Томский государственный архитектурно-
строительный университет, Россия,
Крылов В.В., аспирант,
Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет, Россия,
Евстафьева Е.Б., начальник отдела научного сопровождения,
ООО «Научно-проектное бюро «Конструктивные решения»», Россия,
Андрян К.Р.,
Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет, Россия*
*Ответственный автор E-mail: nik-trekin@yandex.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛИТ НА ПРОДАВЛИВАНИЕ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Аннотация: вопросы прочности и деформативности железобетонных перекрытий при продавливании остаются в настоящее время недостаточно изученными, несмотря на имеющиеся публикации в технической литературе. В данной статье представлены результаты проведения экспериментальных исследований на продавливание фрагментов сопряжения плоских железобетонных монолитных плит с колонной при динамическом нагружении. Целью настоящих исследований было получение экспериментальных данных о напряженно-деформированном состоянии фрагмента монолитного перекрытия при динамическом продавливании при варьировании толщины и класса бетона, выявление схем разрушения экспериментальных образцов, получение новые опытных данных. Описана установка для проведения динамических испытаний. Представлено сравнение разрушающей нагрузки для образцов, испытанных при динамическом нагружении с разрушающей нагрузкой для образцов, испытанных на статическую нагрузку. Указаны углы наклона пирамиды продавливания при статическом и динамическом нагружении.

Ключевые слова: динамическая нагрузка, безбалочная плита, прочность на продавливание

Введение

Вопросы прочности и деформативности железобетонных перекрытий, а также сложность процессов, возникающих в железобетонных конструкциях при кратковременных динамических нагрузках при продавливании, остаются в настоящее время недостаточно изученными, несмотря на имеющиеся публикации в технической литературе [1-6].

Целью настоящих исследований было получение экспериментальных данных о напряженно-деформированном состоянии фрагмента монолитного перекрытия при динамическом продавливании и разработка в дальнейшем пространственной модели на основе метода конечных элементов с последующими численными исследованиями.

Из-за сложности напряженно-деформированного состояния при продавливании наиболее рациональным путем является экспериментально- теоретическое изучение процессов развития деформаций и напряжений от момента нагружения, трещинообразования и до предельного состояния по прочности [4].

Методы и материалы

Программа экспериментального исследования несущей способности безбалочных плит на продавливание при динамическом нагружении, размеры и характеристики образцов подробно представлена в [7].

Экспериментальные исследования проводились на испытательном стенде выполненном на базе копро- вой установки в лаборатории испытания строительных конструкций кафедры «Железобетонные и каменные конструкции» Томского государственного архитектурно-строительного университета.

Стенд для испытания железобетонных элементов на продавливание при кратковременном динамическом нагружении (рис. 1) установлен на силовом полу, для обеспечения жесткого закрепления.

Рис. 1. Стенд для испытания железобетонных элементов на продавливание при кратковременном динамическом нагружении

Fig 1. Stand for testing reinforced concrete elements for punching under short-term dynamic loading

Подробное описание стенда представлено в патенте на изобретение [8].

Все приборы и измерительные датчики объединялись в автоматизированную систему управления испытанием, включающую: измерительную станцию, устройство синхронизации запуска эксперимента, первичные преобразователи измерительной информации (датчики) и грузосбрасыватель.

После поступления команды на запуск эксперимента производилось автоматическое отпускание испытательного груза и запуск на запись измерительной системы.

Схема автоматизированной системы управления испытанием представлена на рис. 2.

Рис. 2. Схема автоматизированной системы управления испытанием

Fig 2. Diagram of the automated test control system

Результаты и обсуждения

В результате выполненных экспериментальных исследований при действии кратковременной динамической нагрузки были получены графики зависимостей от времени, действующей на образец нагрузки, деформаций бетона и арматуры, а также ускорений. В результате выполненных экспериментальных исследований при действии статической нагрузки были получены графики развития действующей на образец нагрузки, а также деформаций бетона и арматуры по этапам нагружения. Кроме того, для всех образцов были получены схемы разрушения и трещинообразования.

Характерный график зависимости деформаций бетона и арматуры от времени для образца, испытанного на действие кратковременной динамической нагрузки, приведен на рис. 3. Время нагружения образца от

нуля до максимальной нагрузки составило 3.22 мс (микросекунды). Деформации сжатого бетона и растянутой арматуры достигали величин, соответствующих в среднем расчетным сопротивлениям, что свидетельствует о предельном состоянии бетона и арматуры в стадии максимальной нагрузки.

После достижения максимальной нагрузки образец продолжал деформироваться и совершал затухающие колебания. График зависимости ускорений от времени для образца, испытанного на действие кратковременной динамической нагрузки приведен на рис. 4.

Рис. 3. График зависимости деформаций бетона и арматуры от времени (для образца $D_{h100}^{B20} - 3$)

Fig 3. Graph of the dependence of concrete and reinforcement deformations on time (for the sample $D_{h100}^{B20} - 3$)

Рис. 4. График зависимости ускорений от времени (для образца $D_{h120}^{B15} - 1$)

Fig 4. Graph of the acceleration dependence on time (for the sample $D_{h120}^{B15} - 1$)

Максимальные зарегистрированные значения действующей нагрузки при всех проведенных испытаниях были сведены в табл. 1. Здесь же представлены полученные по результатам экспериментальных исследований значения коэффициентов динамичности. Следует отметить, что максимальная нагрузка при динамическом нагружении оказалась ниже, чем при статическом нагружении и соответственно коэффициент динамичности получился меньше единицы.

Таблица 1

**Максимальные зарегистрированные значения действующей нагрузки,
угол наклона пирамиды продавливания, коэффициенты динамичности**

Table 1

**The maximum registered values of the effective load, the angle of inclination
of the punching pyramid, the dynamic coefficients**

Высота плитной части	Класс бетона	Кратковременное динамическое нагружение		Статическое нагружение		Коэффициент динамичности K_d
		Маркировка образца и максимальные значения нагрузки, кН/угол пирамиды продавливания		экспериментальное	Расчетная величина разрушающей нагрузки по СП 63 кН	
h=100 мм	B15	$D_{h100}^{B15} - 1$	$D_{h100}^{B15} - 2$	$D_{h100}^{B15} - 3$	$C_{h100}^{B15} - 1$	0,98
		105,948	102,024	101,043	104,967/39	
		среднее значение 103,005/48			67	
	B20	$D_{h100}^{B20} - 1$	$D_{h100}^{B20} - 2$	$D_{h100}^{B20} - 3$	$C_{h100}^{B20} - 1$	0,78
		102,024	106,8309	103,005	133,236/39	
		среднее значение 103,9533/49			80	
h=120 мм	B15	$D_{h120}^{B15} - 1$	$D_{h120}^{B15} - 2$	$D_{h120}^{B15} - 3$	$C_{h120}^{B15} - 1$	0,89
		112,815	111,834	119,682	129,492/40	
		среднее значение 114,777/51			89	
	B20	$D_{h120}^{B20} - 1$	$D_{h120}^{B20} - 2$	$D_{h120}^{B20} - 3$	$C_{h120}^{B20} - 1$	0,77
		128,413	121,644	122,625	160,927/43	
		среднее значение 124,227/52			108	

Схемы разрушения для образцов с толщиной плитной части равной 120 мм, испытанных на действие кратковременной динамической нагрузки приведены на рис. 5. Процесс разрушения узла сопряжения фрагмента перекрытия с колонной при динамическом нагружении происходил так же, как и при статическом нагружении – от среза по поверхности так называемой приведенной пирамиды продавливания. Это обусловлено тем, что наличие горизонтальной нижней растянутой арматуры приводит к возникновению усилий сжатия в бетоне верхней зоны, непосредственно по контуру фрагмента колонны. Это свидетельствует о возникновении изгибающего момента по четырем граням.

Анализ экспериментальных данных показал, снижение несущей способности плит на продавливание при высокоскоростном нагружении связан с уменьшением поверхности приведенной пирамиды продавливания. Сжатая часть поверхности пирамиды продавливания зависит в свою очередь от угла наклона среза и высоты сжатой зоны. Из рассмотрения схем разрушения угол среза оказался существенно больше 45° , принятого для расчета на статическую нагрузку.

Рис. 5. Схемы разрушения для образца $D_{h120}^{B20} - 1$, $D_{h120}^{B20} - 2$

Fig 5. Destruction schemes for the sample $D_{h120}^{B20} - 1$, $D_{h120}^{B20} - 2$

Результаты проведенных экспериментальных исследований сопротивления узла сопряжения перекрытия с колонной продавливанию и анализ развития напряженно-деформированного состояния образцов при нагружении до момента разрушения показали следующее (табл. 1):

- максимальные значения нагрузки для проведенных испытаний составили: при кратковременном динамическом воздействии от 101,043 кН до 128,413 кН; при статическом воздействии от 104,967 кН до 160,927 кН;

- снижение несущей способности перекрытия на продавливание при времени нагружения от нуля до разрушения 3.22мс по сравнению со статическим приложением нагрузки в среднем составило 15%;

- схема разрушения при высокоскоростном нагружении по характеру аналогична при статическом нагружении и происходит от среза по сжатой части поверхности пирамиды продавливания;

- наиболее вероятной причиной снижения несущей способности фрагмента железобетонной плиты на продавливание является снижение поверхности среза вследствие увеличения угла наклона граней пирамиды продавливания.

Литература

1. Однокопылов Г.И., Саркисов Д.Ю. Оценка параметров разрушающей нагрузки при ударно-волновом нагружении для ответственных строительных конструкций сооружений нефтегазового комплекса // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 3. С. 89 – 95.
2. Однокопылов Г.И. Саркисов Д.Ю., Бутузов Е.А. Оценка степени живучести ответственных строительных конструкций при ударно-волновом нагружении // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 12. С. 122 – 135.
3. Трекин Н.Н., Крылов В.В. К вопросу о несущей способности железобетонных плит на продавливание при динамическом нагружении на объектах наземной космической инфраструктуры // Научный аспект. 2018. Т. 7. № 4. С. 771.
4. Клованич С.Ф., Шеховцов В.И. Продавливание железобетонных плит. Натурный и численный эксперименты, Одесса: ОНМУ, 2011. 61 с.
5. Бирбраер А.Н., Роледер А.Ю. Экстремальные воздействия на сооружения. 2009.
6. Крылов В.В. Проверка несущей способности монолитной железобетонной плиты на продавливание при действии динамической нагрузки // Научный аспект. 2019. Т. 3. № 3. С. 320 – 325.

7. Крылов В.В., Саркисов Д.Ю., Эргешов Э.Т., Евстафьева Е.Б., "Программа экспериментальных исследований несущей способности безбалочных плит на продавливание при динамическом нагружении. Конструкция опытных образцов" // Строительные материалы и изделия. 2020. Т. 3. № 3.
8. Патент на изобретение № 2726031 Стенд для испытания железобетонных элементов на продавливание при кратковременной динамической нагрузке.
9. Sarkisov D.Yu., Odnokopylov G.I., Krylov V.V., Annenkov A.O. Numerical and experimental studies of deflections of conventional and strengthened reinforced concrete bendable elements under short-term dynamic loading // Incas bulletin 2021. Vol. 13. Special Issue. https://bulletin.incas.ro/files/sarkisov_odnokopylov_krylov_all_vol_13_special_iss.pdf
10. Jun Yu, Li-zhong Luo, Qin Fang, Structure behavior of reinforced concrete beam-slab assemblies subjected to perimeter middle column removal scenario // Engineering Structures. 2020. Vol. 208. № 110336. P. 1 – 19. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110336>
11. Alejandro Pérez Caldentey, Yolanda G. Diego, Freddy Ariñez Fernández, Anastasio P. Santos, Testing robustness: A full-scale experimental test on a two-storey reinforced concrete frame with solid slabs // Engineering Structures. 2021. Vol. 240. № 112411. P. 1 – 17. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112411>
12. Jinjie Men, Liquan Xiong, Jiachen Wang, Guanlei Fan, Effect of different RC slab widths on the behavior of reinforced concrete column and steel beam-slab subassemblies // Engineering Structures. 2021. Vol. 229. № 111639. P. 1 – 13. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111639>
13. Mohamed Eladawy, Mohamed Hassan, Brahim Benmokrane, Emmanuel Ferrier, Lateral cyclic behavior of interior two-way concrete slab-column connections reinforced with GFRP bars // Engineering Structures. 2020. Vol. 209. № 109978. P. 1 – 15. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109978>
14. Deifalla A. A mechanical model for concrete slabs subjected to combined punching shear and in-plane tensile forces // Engineering Structures. 2021. Vol. 231. № 111787. P. 1 – 14. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111787>
15. Yu J.L., Wang Y.C. Modelling and design method for static resistance of a new connection between steel tubular column and flat concrete slab // Journal of Constructional Steel Research. 2020. Vol. 173. № 106254. P. 1 – 16. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106254>
16. Kumar K.V. Kartik M.A. Iqbal, Experimental and numerical investigation of reinforced concrete slabs under blast loading // Engineering Structures. 2020. Vol. 206. № 110125. P. 1 – 13. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110125>
17. Mao L., Barnett S.J., Tyas A., Warren J., Schleyer G.K., Zaini S.S. Response of small scale ultra high performance fibre reinforced concrete slabs to blast loading // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 93. P. 822 – 830. ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.085>
18. Fernández Ruiz M., Mirzaei Y., Muttoni A., Post-Punching Behavior of Flat Slabs // ACI Structural Journal. USA, 2013. Vol. 110. P. 801 – 812. <https://www.researchgate.net/publication/283905342>
19. Melo G.S. Behaviour of Reinforced Concrete Flat Slabs after Local Failure. PhD thesis, Polytechnic of Central London, London, UK, 1990, 214 pp, <https://www.researchgate.net/publication/352157118>
20. More R.S., Sawant V.S. Analysis of Flat Slab. July, 2015. Vol. 4. Issue 7. https://www.ijcsr.net/get_abstract.php

References

1. Odnokopylov G.I., Sarkisov D.YU. Estimation of Parameters of Breaking Load Under Shock-Wave Loading for Critical Building Structures of Oil and Gas Complex Structures. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Georesource Engineering. 2017. 328 (3). P. 89 – 95. (rus.)
2. Odnokopylov G.I. Sarkisov D.Yu., Butuzov E.A. Assessment of the Degree of Survivability of Critical Building Structures Under Shock-Wave Loading. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Georesource Engineering. 2018. 329 (12). P. 122 – 135. (rus.)
3. Trekin N.N., Krylov V.V. On the issue of the Punching Shear Capacity of Reinforced Concrete Slabs Under Dynamic Loading at Ground Space Infrastructure Facilities. Scientific Aspect. 2018. 7 (4). P. 771. (rus.)
4. Klovanih S.F., Shekhovtsov V.I. Punching Reinforced Concrete Slabs. Full-scale and Numerical Experiments, Odessa: Odesa National Maritime University, 2011. 61 p. (rus.)
5. Birbraer A.N., Roleder A.Yu. Extreme Impacts on Structures. 2009. (rus.)
6. Krylov V.V. Checking the Punching Shear Capacity of a Monolithic Reinforced Concrete Slab Under A Dynamic Load. Scientific Aspect. 2019. 3 (3). P. 320 – 325. (rus.)

7. Krylov V.V., Sarkisov D.Yu., Ergeshov E.T., Evstaf'eva E.B. Program of Experimental Studies of the Punching Shear Capacity of Flat Slabs Under Dynamic Loading. Design of Prototypes. Building Materials and Products. 2020. 3 (3). (rus.)
8. Patent for invention No. 2726031 Stand for Testing Reinforced Concrete Elements for Punching Shear Under Short-Term Dynamic Load. (rus.)
9. Sarkisov D.Yu., Odnokopylov G.I., Krylov V.V., Annenkov A.O. Numerical and experimental studies of deflections of conventional and strengthened reinforced concrete bendable elements under short-term dynamic loading. Incas bulletin 2021. 13. Special Issue. https://bulletin.incas.ro/files/sarkisov_odnokopylov_krylov_all_vol_13_special_iss.pdf
10. Jun Yu, Li-zhong Luo, Qin Fang, Structure behavior of reinforced concrete beam-slab assemblies subjected to perimeter middle column removal scenario. Engineering Structures. 2020. 208 (110336). P. 1 – 19. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110336>
11. Alejandro Pérez Caldentey, Yolanda G. Diego, Freddy Ariñez Fernández, Anastasio P. Santos, Testing robustness: A full-scale experimental test on a two-storey reinforced concrete frame with solid slabs. Engineering Structures. 2021. 240 (112411). P. 1 – 17. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112411>
12. Jinjie Men, Liquan Xiong, Jiachen Wang, Guanlei Fan, Effect of different RC slab widths on the behavior of reinforced concrete column and steel beam-slab subassemblies. Engineering Structures. 2021. 229 (111639). P. 1 – 13. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111639>
13. Mohamed Eladawy, Mohamed Hassan, Brahim Benmokrane, Emmanuel Ferrier, Lateral cyclic behavior of interior two-way concrete slab-column connections reinforced with GFRP bars. Engineering Structures. 2020. 209 (109978). P. 1 – 15. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109978>
14. Deifalla A. A mechanical model for concrete slabs subjected to combined punching shear and in-plane tensile forces. Engineering Structures. 2021. 231 (111787). P. 1 – 14. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111787>
15. Yu J.L., Wang Y.C. Modelling and design method for static resistance of a new connection between steel tubular column and flat concrete slab. Journal of Constructional Steel Research. 2020. 173 (106254). P. 1 – 16. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106254>
16. Kumar K.V. Kartik M.A. Iqbal, Experimental and numerical investigation of reinforced concrete slabs under blast loading. Engineering Structures. 2020. 206 (110125). P. 1 – 13. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110125>
17. Mao L., Barnett S.J., Tyas A., Warren J., Schleyer G.K., Zaini S.S. Response of small scale ultra high performance fibre reinforced concrete slabs to blast loading. Construction and Building Materials. 2015. 93. P. 822 – 830. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.085>
18. Fernández Ruiz M., Mirzaei Y., Muttoni A., Post-Punching Behavior of Flat Slabs. ACI Structural Journal. USA, 2013. 110. P. 801 – 812. <https://www.researchgate.net/publication/283905342>
19. Melo G.S., “Behaviour of Reinforced Concrete Flat Slabs after Local Failure,” PhD thesis, Polytechnic of Central London, London, UK, 1990, 214 p. <https://www.researchgate.net/publication/352157118>
20. More R.S., Sawant V.S. Analysis of Flat Slab. July, 2015. 4 (7). https://www.ijsr.net/get_abstract.php

Trekin N.N.*, *Doctor of Engineering Sciences (Advanced Doctor), Professor,
National Research Moscow State University of Civil Engineering, Russia,*
Sarkisov D.Yu., *Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Associate Professor,
Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Russia,*
Krylov V.V., *Postgraduate,
National Research Moscow State University of Civil Engineering, Russia,*
Evstafyeva E.B., *Head of Scientific Support Department,
LLC "Scientific and Design Bureau "Constructive solutions", Russia,*
Andryan K.R.,
National Research Moscow State University of Civil Engineering, Russia
*Corresponding author E-mail: nik-trekin@yandex.ru

EXPERIMENTAL STUDY OF PLATES FOR PUNCHING UNDER DYNAMIC LOADING

Abstract: the issues of strength and deformability of reinforced concrete floors during punching remain insufficiently studied at present, despite the available publications in the technical literature. This article presents the results of experimental studies on punching of fragments of conjugation of flat reinforced concrete monolithic slabs with a column under dynamic loading. The purpose of these studies was to obtain experimental data on the stress-strain state of a fragment of a monolithic floor during dynamic punching with varying thickness and class of concrete, to reveal the failure patterns of experimental samples, and to obtain new experimental data. A setup for dynamic testing is described. Comparison of breaking load for specimens tested under dynamic loading with breaking load for specimens tested for static load is presented. The angles of inclination of the punching shear pyramid under static and dynamic loading are indicated.

Keywords: dynamic load, girderless slab, punching strength

Для цитирования: Трекин Н.Н., Саркисов Д.Ю., Крылов В.В., Евстафьева Е.Б., Андриян К.Р. Экспериментальное исследование плит на продавливание при динамическом нагружении // Строительные материалы и изделия. 2021. Том 4. № 4. С. 41 – 48. DOI: 10.34031/2618-7183-2021-4-4-41-48

For citation: Trekin N.N., Sarkisov D.Yu., Krylov V.V., Evstafyeva E.B., Andryan K.R. Experimental study of plates for punching under dynamic loading. Construction Materials and Products. 2021. 4 (4). P. 41 – 48. DOI: 10.34031/2618-7183-2021-4-4-41-48

Поступила в редакцию 25 июня 2021 г.

Принята в доработанном виде 19 июля 2021 г.

Одобрена для публикации 21 августа 2021 г.

Received: June 25, 2021.

Revised: July 19, 2021.

Accepted: August 21, 2021.