УДК 624.071

© С. В. Цыбакин, канд. техн. наук, доцент
© М. Г. Плюснин, старший преподаватель, аспирант
(Костромская государственная сельскохозяйственная академия, пос. Караваяево, Костромская область, Россия)
E-mail: apraiser3@yandex.ru
© А. Н. Зотов, начальник ОТК
(ООО «Бетонорастворный завод» (BERAZ)
Кострома, Россия)
E-mail: alex-zotov1986@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-5-63-69

© S. V. Tsybakin, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
© M. G. Plyusnin, senior teacher, post-graduate student
(Kostroma State Agricultural Academy, Karavaevo, Kostroma region, Russia)
E-mail: apraiser3@yandex.ru
© A. N. Zotov, Head of the QC Department
(LLC «Betonorastvornyzavod» (BERAZ)
Kostroma, Russia)
E-mail: alex-zotov1986@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ВЫРЕЗОВ В ПЛИТАХ БЕЗОПАЛУБОЧНОГО ФОРМОВАНИЯ НА ИХ НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ

THE INFLUENCE OF CUTOUTS IN SLABS OF FORMWORK-FREE MOLDING ON THEIR LOAD-BEARING CAPACITY

Приведены результаты испытаний плиты безопалубочного формования (плиты ПБ) на прочность и численного исследования конечноэлементной модели данной плиты. Показано, что при угловом вырезе в плите ПБ снижается ее несущая способность и меняется характер разрушения. Частичная компенсация снижения несущей способности плиты с таким вырезом может быть достигнута путем снижения величины предварительного напряжения обрезаемых при формировании выреза арматурных стержней либо перераспределением арматуры по поперечному сечению плиты.

Ключевые слова: пустотные плиты безопалубочного формования, численное моделирование, несущая способность.

The paper presents the results of testing the slab of formwork-free molding (PB slab) for strength, as well as numerical study of the finite element model of this slab. It is shown that with an angular cutout in the PB slab, its load bearing capacity decreases and the nature of fracture changes. Partial compensation for the load-bearing capacity reduction of the slab with such a cutout can be achieved by reducing the pre-stressing reinforcement value of reinforcement rods cut off during the formation of the cutout, or by redistributing the reinforcement along the cross-section of the slab.

Keywords: hollow-core slabs of formwork-free molding, numerical simulation, load bearing capacity.

Введение

В настоящее время в строительстве зданий и сооружений широко применяются пустотные плиты безопалубочного формования (плиты ПБ). Данный вид железобетонных изделий в первую очередь удобен для производителя — завода ЖБИ, так как позволяет существенно сократить издержки при производстве плит по сравнению с агрегатно-поточным или конвейерным способами. Также достоинствами данной технологии является возможность получения плит различной длины и углов реза торцов. Особенности плит ПБ являются наличие только продольной, расположенной вдоль плиты, предварительно напряженной арматуры (величина предвари-

тельного напряжения, как правило, находится в диапазоне 900...1100 МПа), отсутствие продольной арматуры, расположенной поперек плиты, и отсутствие поперечной арматуры. В связи с этим для обеспечения несущей способности по наклонным сечениям для изготовления плит ПБ используются бетоны класса В35...В45.

Прочность, жесткость и трещиностойкость плит ПБ позволяют широко использовать их в строительной индустрии [1–4]. Недавно появившийся нормативный документ СП 335.1325800.2017 «Крупнопанельные конструктивные системы. Правила проектирования» содержит основные расчетные и конструктивные требования к плитам безопалубочного

формования, что облегчает проектирование с использованием этих плит. Однако ряд вопросов, возникающих при использовании плит ПБ, еще не решен. Одним из таких вопросов является устройство в плитах вырезов, которые необходимы для прохода различных коммуникаций. СП 335.1325800.2017 содержит общие требования к допустимым размерам вырезов и отверстий в плитах ПБ. Данный документ предписывает при расчетах плит перекрытия использовать СП 63.1333.2018, который содержит методики расчета изгибаемых элементов по нормальному и наклонному сечениям. Очевидно, что обычно используемая для плит перекрытия расчетная схема в виде однопролетной балки с равномерно распределенной нагрузкой не отражает напряженно-деформированное состояние плиты с предварительно напряженной арматурой и вырезом. В работе [5] показано, что устройство отверстий в плитах безопалубочного формования приводит не только к снижению несущей способности, но и к изменению характера разрушения. Проблема усугубляется тем, что технология безопалубочного формования не позволяет размещать в плите дополнительное армирование, обрамляющее вырез или отверстие. Наиболее невыгодным с точки зрения снижения несущей способности является продольный вырез вдоль пустот плиты с удалением части крайнего ребра вместе с предварительно напряженной продольной арматурой.

Целью работы, описанной в настоящей статье, являлось исследование особенностей напряженно-деформированного состояния и характера разрушения плиты ПБ с продольным вырезом на углу плиты.

Материалы и методы

На заводе по изготовлению железобетонных изделий ООО «Бетонорастворный завод» (г. Кострома) была изготовлена и затем испытана плита ПБ 72.12-8К7 с продольным вырезом на углу. Длина плиты 7200 мм, ширина 1200 мм. Плита изготовлена из бетона В40, армирована семью предварительно напряженными канатами 12К7 в нижней зоне. Арматура в верхней зоне плиты отсутствовала. Величина предварительного напряжения арматуры составляла 1000 МПа. Расчетная нагрузка на плиту без выреза 8 кПа. При формовании плиты в ней был

сделан вырез от торца вдоль пустот. Длина выреза составила 1500 мм, ширина 300 мм. Таким образом, у плиты были фактически перерезаны два арматурных каната — крайний и второй от края. После достижения проектной прочности бетона были проведены испытания в соответствии с ГОСТ 8829–94. Плита загружалась по схеме однопролетной балки с шарнирными опорами, нагрузка создавалась заранее взвешенными бетонными блоками. Параллельно с натурными испытаниями был проведен численный эксперимент с конечноэлементной моделью данной плиты. Примеры подобного моделирования и положительные стороны учета фактической геометрии объекта описаны в работах [6–8]. Бетон моделировался объемными конечными элементами, а предварительно напряженная арматура — стержневыми. Вычисления осуществлялись в линейной постановке, так как, по данным [1–4], до возникновения трещин работа плит ПБ близка к упругой. Вид конечноэлементной модели плиты показан на рис. 1. Предварительное напряжение арматуры задавалось с учетом потерь предварительного напряжения, рассчитанных по действующим нормативным документам. Нагрузка на модель увеличивалась шагами по аналогии с натурными испытаниями. Необходимо заметить, что использованная модель позволяет только оценить напряженно-деформированное состояние объекта исследования. Упрощенное представление арматуры стержневыми конечными элементами совместно с неучетом нелинейной работы бетона в зоне контакта с предварительно напряженной арматурой искажает результаты расчета.

Результаты

При натурном эксперименте разрушение плиты произошло при величине нагрузки 10,2 кПа, что на 20 % ниже контрольной для плиты ПБ 72.12-8К7 без выреза по ГОСТ 8829–94. Разрушение имело хрупкий характер и проявилось продольной трещиной от угла выреза вдоль пустоты плиты, при развитии которой произошло обрушение части плиты с обрезанной арматурой. При этом остальная часть плиты сохранила несущую способность, хотя на ней появились нормальные трещины в середине пролета. Наклонные трещины в процессе испытаний не образовывались. Вид плиты после разрушения показан на рис. 2.

Рис. 1. Конечноэлементная модель плиты ПБ 72.12-8К7 с вырезом

Полученный характер разрушения плиты не может быть учтен при использовании описанных в СП 63.1333.2018 методик расчета изгибаемых элементов.

Численное моделирование показало, что угол выреза является концентратором напряжения и около него в бетоне возникают растягивающие напряжения. Области, где главные растягивающие деформации превышают нормативное значение предельных деформаций бетона при растяжении (0,15 ‰), полученные при численном моделировании процесса испытаний при на-

грузке, соответствующей моменту разрушения плиты по ее верхней и нижней граням, показаны на рис. 3 и 4 соответственно. Для удобства на рисунках показан фрагмент, включающий вырез и примыкающие к нему области плиты. Таким образом, причиной продольной трещины, возникающей в плите ПБ с вырезом, являются растягивающие напряжения, концентратором которых является угол выреза. В свою очередь, данные растягивающие напряжения возникают из-за предварительного напряжения продольной арматуры, расположенной в вырезе. Анализ

Рис. 2. Вид плиты после разрушения

Рис. 3. Области превышения значениями главных растягивающих деформаций нормативного значения предельных деформаций бетона при растяжении на верхней грани плиты

Рис. 4. Области превышения значениями главных растягивающих деформаций нормативного значения предельных деформаций бетона при растяжении на нижней грани плиты

результатов расчета показал, что заметное растяжение имеется в углу выреза даже при отсутствии нагрузки. Например, при величине предварительного напряжения арматуры, с учетом потерь равной 800 МПа, максимальное значение главных растягивающих деформаций в углу выреза на верхней грани ненагруженной плиты составило 0,146 ‰.

Для проверки влияния величины предварительного напряжения находящейся в вырезе арматуры на напряженно-деформированное состояние плиты проведен расчет при различных значениях предварительного напряжения обрезанной арматуры. Результаты приведены на рис. 5.

Таким образом, величина главных растягивающих деформаций в вырезе плиты зависит от предварительного напряжения обрезанной арматуры. При снижении величины предварительного напряжения с 800 МПа до 500 МПа значения

главных растягивающих деформаций уменьшились на 12,2 %: с 0,515 ‰ до 0,452 ‰. Прогиб плиты при тех же значениях предварительного напряжения обрезанной арматуры показан рис. 6. При изменении σ_{sp} в пределах 500...800 МПа величина прогиба при расчетной нагрузке находится в диапазоне 6,9...7,7 мм (большее значение прогиба соответствует меньшему значению предварительного напряжения) и не превышает 0,0015 пролета плиты. Следовательно, путем снижения величины предварительного напряжения обрезаемой при устройстве выреза арматуры возможно несколько увеличить несущую способность плиты ПБ с вырезом. Увеличение несущей способности будет сопровождаться незначительным ростом прогиба плиты.

Еще одним вариантом увеличения несущей способности плит ПБ с вырезами, который по своей сущности аналогичен описанному выше, является использование в обрезанных ребрах

Рис. 5. Зависимость максимальных главных растягивающих деформаций по верхней грани плиты при расчетной нагрузке от величины предварительного напряжения обрезанной арматуры

Рис. 6. Зависимость прогиба плиты при расчетной нагрузке от величины предварительного напряжения обрезанной арматуры

арматуры меньшего диаметра и добавление арматурных стержней в необрезанные ребра плиты, то есть изменение схемы армирования. Величина предварительного напряжения арматурных канатов при этом остается одинаковой по всему поперечному сечению плиты.

Представленные в статье материалы носят предварительный характер, так как исследования по данной теме продолжаются.

Выводы

1. Устройство вырезов в плитах безопалубочного формования приводит к изменению харак-

тера их разрушения, что не учтено в действующих методиках расчета несущей способности изгибаемых железобетонных элементов по нормальным и наклонным сечениям.

2. При устройстве вырезов в плитах ПБ необходимо численное моделирование, основанное на результатах натурных экспериментов и учитывающее работу бетона совместно с предварительно напряженной арматурой.

3. Несущая способность плиты ПБ с угловым вырезом зависит от величины предварительного напряжения арматуры, попадающей в вырез. Снижение предварительного напряжения этой арматуры способствует повышению несущей способности плиты.

4. В плитах с вырезами для компенсации снижения несущей способности целесообразно уменьшать армирование перерезанных ребер и увеличивать площадь арматуры в ребрах, остающихся целыми.

Библиографический список

1. Прокопович А. А., Репекто В. В., Алёшин А. Н. Пустотные плиты безопалубочного формования. Проблемы применения и результаты исследований // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство: сб. статей. Самара: Самарский гос. техн. ун-т, 2018. С. 150–154.
2. Селютин Л. Ф. Исследования железобетонных плит безопалубочного формования // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство: сб. материалов II Нац. науч.-практ. конф. (Омск, 18–19 апреля 2019 г.). Омск: СибАДИ, 2019. С. 445–449.
3. Micheline E., Bernardi P., Cerioni R., Belletti B. Experimental and Numerical Assessment of Flexural and Shear Behavior of Precast Prestressed Deep Hollow-Core Slabs // International Journal of Concrete Structures and Materials. 2020. Vol. 14, no. 31. URL: <https://doi.org/10.1186/s40069-020-00407-y>.
4. Воронов В. И., Михайлов В. В., Рощина С. И. Результаты контрольных испытаний многопустотных предварительно напряженных плит перекрытий стенового безопалубочного формования // Научно-технический вестник Поволжья. 2011. № 5. С. 89–92.
5. Sameer Kumar Sarma P., Suriya Prakash S. Performance of Prestressed Hollowcore Slabs with and without Cutouts // International Journal of Research in Engineering and Technology. 2015. Vol. 04. Special Issue 13. Pp. 443–447.
6. Васильев А. С., Назарова В. П. Численное исследование напряженного состояния усиленных пустотных железобетонных плит при появлении трещин // Вестник Евразийской науки. 2019. Т. 11, № 2. С. 60. URL: <https://esj.today/PDF/06SAVN219.pdf>.
7. Васильев А. С., Плеханова Е. А. Аналитическое и численное исследование нагрузки трещинообразования пустотных плит // Вестник Приамурского гос. ун-та им. Шолом-Алейхема. 2020. № 1 (38). С. 16–23.
8. Васильев А. С., Назарова В. П. Численное исследование пустотных плит в современных программных комплексах // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2019. Т. 1, № 3. С. 37–42.

References

1. Prokopovich A. A., Repekto V. V., Alyoshin A. N. Pustotnye plity bezopalubochного formovaniya. Problemy primeneniya i rezul'taty issledovaniy [Hollow core slabs of formless molding. Problems of application and research results]. Sb. statey «Traditsii i innovatsii v stroitel'stve i arkhitekture. Stroitel'stvo» [In: Coll. of works «Traditions and innovations in construction and architecture. Construction»]. Samara, Samarskiy Gos. Tekhn. Un-t Publ., 2018, pp. 150–154.
2. Selyutina L. F. Issledovaniya zhelezobetonnykh plit bezopalubochного formovaniya [Studies of reinforced concrete slabs of formwork free molding]. Sb. materialov II Nats. nauch.-prakt.konf. (Omsk, 18–19 aprelya 2019 g.) «Obrazovanie. Transport. Innovatsii. Stroitel'stvo» [Proceedings of the II National scientific and practical conference (Omsk, April 18–19, 2019) «Education. Transport. Innovation. Construction»]. Omsk, SibADI Publ., 2019, pp. 445–449.
3. Micheline E., Bernardi P., Cerioni R., Belletti B. Experimental and Numerical Assessment of Flexural and Shear Behavior of Precast Pre-stressed Deep Hollow-Core Slabs. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2020, vol. 14, no. 31. <https://doi.org/10.1186/s40069-020-00407-y>.
4. Voronov V. I., Mikhaylov V. V., Roshchina S. I. Rezul'taty kontrol'nykh ispytaniy mnogopustotnykh predvaritel'no napryazhennykh plit perekrytiy stendovogo bezopalubochного formovaniya [The results of control tests of multi-hollow prestressed floor slabs of bench-type formwork free molding]. Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya – Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region, 2011, no. 5, pp. 89–92.
5. Sameer Kumar Sarma P., Suriya Prakash S. Performance of prestressed hollowcore slabs with and without cutouts. International Journal of Research in Engineering and Technology, 2015, vol. 4, special iss. 13, pp. 443–447.
6. Vasil'ev A. S., Nazarova V. P. Chislennoe issledovanie napryazhennogo sostoyaniya usilennykh pustot-

pustotnykh zhelezobetonnykh plit pri poyavlenii treshchin [Numerical study of the stress state of reinforced hollow core reinforced concrete slabs with emergence of cracks]. *Vestnik Evraziyskoy nauki – Bulletin of Eurasian Science*, 2019, vol. 11, no. 2, p. 60. <https://esj.today/PDF/06SAVN219.pdf>

7. Vasil'ev A. S., Plekhanova E. A. *Analiticheskoe i chislennoe issledovanie nagruzki treshchinoobrazovaniya pustotnykh plit* [Analytical and numerical study of the crack formation load of hollowcore slabs]. *Vestnik*

Priamurskogo gos. un-ta im. Sholom-Aleykhema – Bulletin of the Amur State University named after Sholom Aleichem, 2020, no. 1 (38), pp. 16–23.

8. Vasil'ev A. S., Nazarova V. P. *Chislennoe issledovanie pustotnykh plit v sovremennykh programmnykh kompleksakh* [Numerical study of hollowcore slabs in modern software complexes]. *Dal'niy Vostok: problemy razvitiya arkhitekturno-stroitel'nogo kompleksa – The Far East: Problems of the development of the architectural and construction complex*, 2019, vol. 1, no. 3, pp. 37–42.