

Экспериментальное исследование работы железобетонной плиты перекрытия при продавливании колонной

В.Б. Филатов, З.Ш. Галяутдинов, М.В Коваленко

Самарский государственный технический университет

Аннотация: Представлен краткий анализ зависимостей для расчета на продавливание железобетонных плит, используемых в отечественных и зарубежных нормах проектирования. Приведены результаты экспериментального исследования на опытных образцах прочности монолитной плиты перекрытия при центральном продавливании колонной квадратного и прямоугольного сечения. Сравнительный анализ опытных и расчетных значений разрушающих нагрузок показал значительное превышение расчетных значений для образца с колонной прямоугольного сечения. Отмеченное превышение расчетных значений разрушающих нагрузок над опытными величинами связано с наличием особенностей напряженно-деформированного состояния в зоне продавливания для колонн прямоугольного сечения. Отмеченное при испытаниях превышение расчетной величины разрушающей нагрузки над опытным значением указывает на снижение конструктивной безопасности подобных узлов сопряжения в монолитном безбалочном каркасе зданий.

Ключевые слова: железобетон, монолитный безбалочный каркас, продавливание, площадка нагружения, опытный образец, разрушающая нагрузка, призмная прочность, деформация, тензорезистор.

Железобетонные конструкции являются основой устойчивого развития современного строительства. Из железобетона возводят промышленные здания и сооружения, здания гражданского назначения, объекты транспортного строительства. В связи с востребованностью и повсеместным использованием железобетона, крайне актуальным является вопрос совершенствования методов расчета и проектирования, так как это напрямую влияет на материалоемкость и энергозатраты при строительстве, а также на надёжность и долговечность конструкций.

Одним из основных трендов последнего десятилетия в области конструктивных схем возводимых зданий является применение железобетонных монолитных безбалочных каркасов. Популярность этого конструктивного решения обусловлена несколькими причинами, одной из которых является высокая технологичность производства бетонных работ на стройплощадке и, как следствие, оптимизация технико-экономических

показателей [1]. Кроме того, повсеместное использование современных программных комплексов в значительной степени позволило разрешить проблемы расчета и проектирования подобных конструктивных систем [2].

В то же время следует осознавать, что программный комплекс выполняет расчеты по заложенному алгоритму, который с той или иной степенью достоверности отражает наши представления о работе конструкций и конструктивной системы в целом. Таким образом, степень соответствия расчетных моделей фактической работе конструктивных элементов здания, оказывает существенное влияние на достоверность результатов расчета программного комплекса и их корректную интерпретацию [3, 4].

Одним из сложных расчетных случаев является реализация в программном комплексе расчета на действие перерезывающих сил, поскольку расчетная модель наклонных сечений в нормах проектирования СП 63.13330.2018 (СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения) имеет сугубо эмпирическую основу, как для балочных элементов, так и для плит, в том числе при расчете на продавливание. Расчёт на продавливание железобетонных плит производят при действии на них концентрированно приложенных усилий – сосредоточенной силы и изгибающего момента. При расчёте на продавливание в соответствии с СП 63.13330.2018 рассматривают расчётное поперечное сечение, расположенное по периметру зоны передачи усилий на элемент на расстоянии $h_0/2$ нормально к его продольной оси, по поверхности которого действуют касательные усилия от сосредоточенной силы и изгибающего момента.

Действующие касательные усилия по площади расчётного поперечного сечения должны восприниматься бетоном с сопротивлением растяжению R_{bt} и расположенной по обе стороны от расчётного поперечного сечения на расстоянии $h_0/2$ поперечной арматурой с сопротивлением растяжению R_{sw} .

Расчёт элементов без поперечной арматуры на продавливание при действии сосредоточенной силы производят из условия:

$$F \leq R_{bt} \times u \times h_0, \quad (1)$$

где: F - усилие продавливания; u - периметр контура расчётного поперечного сечения, расположенного на расстоянии $h_0/2$ от границы площадки нагружения силой F ; h_0 - рабочая высота элемента, равная среднеарифметическому значению рабочих высот для продольной арматуры; R_{bt} - расчётное значение сопротивления бетона осевому растяжению.

При размерах прямоугольной площадки опирания $a \times b$ и рабочей высоте h_0 периметр расчётного контура поперечного сечения определяют по формуле: $u = 2(a+b+2h_0)$.

В соответствии с ACI-318 [5] усилие при продавливании определяется, исходя из рассмотрения трёх условий:

$$V_c = (2 + 4/\beta) \times \sqrt{f'_c} \times b_0 \times d \quad (2)$$

$$V_c = (2 + \alpha_s \times d/b_0) \times \sqrt{f'_c} \times b_0 \times d \quad (3)$$

$$V_c = 4 \times \sqrt{f'_c} \times b_0 \cdot d, \quad (4)$$

где: β - отношение длинной и короткой сторон колонны; $\sqrt{f'_c}$ - прочностная характеристика бетона; b_0 - периметр расчётного контура; d - расстояние от сжатой грани бетона до центра тяжести растянутой арматуры; α_s - коэффициент, учитывающий расположение колонны на плане перекрытия.

После расчёта из трёх значений выбирается минимальное, которое и определяет максимально допустимое усилие продавливания.

Сравнение расчетных зависимостей СП 63.13330.2018 и ACI-318 показывает, что в североамериканских нормах проектирования учитывается большее количество конструктивных параметров (отношение сторон

колонны, отношение высоты сечения плиты к величине расчетного контура продавливания). В то же время, представленные в формулах (2) и (3) коэффициенты β и α_s имеют эмпирическую природу, поскольку получены на основе анализа результатов экспериментальных исследований. Вследствие эмпирического подхода к расчету на продавливание, остаются актуальными вопросы совершенствования расчета плоских перекрытий [6 – 8] и экспериментального изучения влияния конструктивных параметров на напряженно-деформированное состояние плоских плит перекрытий при продавливании [9 – 11]. Зарубежные исследования, связанные с тематикой продавливания плоских железобетонных плит весьма значительны и направлены как на совершенствование расчетных моделей [12, 13], так и на получение новых экспериментальных данных о работе железобетонных плит на продавливание [14, 15].

Экспериментальное исследование работы плоской железобетонной плиты перекрытия при продавливании выполнялось на опытных образцах с квадратной и прямоугольной колонной. Прямоугольная колонна имела соотношение сторон сечения 1 к 4. Испытание образцов проводилось на базе лаборатории кафедры «Строительные конструкции» Академии строительства и архитектуры СамГТУ. Нагружение образца производилось ступенями, с выдержкой на каждой ступени нагружения и осуществлялось 50-тонным гидравлическим домкратом, который был установлен на силовом полу через распределительные стальные пластины. Домкрат предварительно тарировался для получения зависимости «давление – усилие». Затем на домкрат через центрирующую шайбу и стальную пластину устанавливался образец. Образец удерживался траверсами, которые устанавливались на плиту образца через шарниры. Стальные пластины шарниров устанавливались на плиту через цементно-песчаный раствор. Траверсы фиксировались с помощью гаек на стальных тягах. Второй конец стальных

тяг проходил через распределительные балки под плитой образца. Распределительные балки шпильками закреплялись в силовом полу.

Вид образца перед испытанием представлен на рис. 1. Для измерения деформаций бетона были установлены тензорезисторы на сжатой грани плиты (рис. 2), также фиксировались деформации растянутой арматуры.

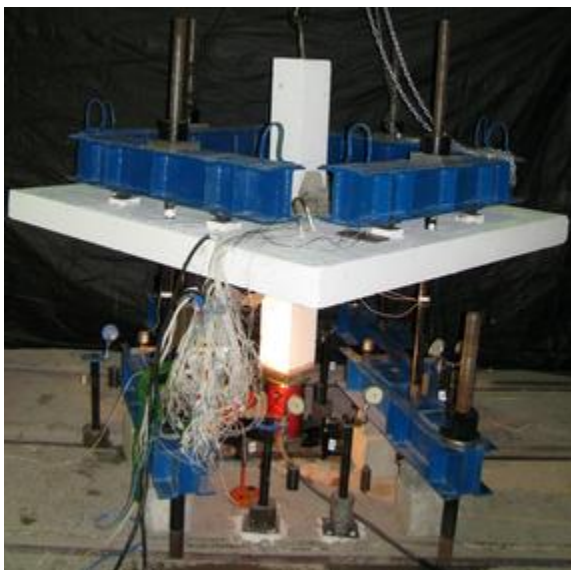


Рис. 1 – Образец перед испытанием



Рис. 2 – Тензорезисторы на бетоне сжатой грани плиты

При бетонировании образца были изготовлены бетонные кубы с размером грани 100 мм и бетонные призмы размером 150×150×600 мм, с целью определения прочностных и деформационных характеристик бетона. Бетонные кубы испытывались на сжатие и раскалывание по стандартной методике в соответствии с требованиями ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». По результатам испытаний на сжатие среднее значение кубиковой прочности бетона, приведенной к стандартному образцу, составило $R = 33 - 36$ МПа. Прочность бетона на осевое растяжение, определенная по результатам испытаний кубов на раскалывание, составила $R_{bt} = 1,8$ МПа.

Призменная прочность бетона была определена по результатам испытаний бетонных призм. Результаты обрабатывались по ГОСТ 24452-80

«Бетоны. Методы определения призмной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона». Среднее значение призмной прочности бетона составило $R_b = 29$ МПа. По результатам испытаний были построены кривые « σ - ϵ » для бетона при сжатии.

Также были испытаны образцы рабочей арматуры диаметром 14 мм, использовавшейся при армировании плиты образца. Испытания были проведены в соответствии с требованиями ГОСТ 12004-81 «Сталь арматурная. Методы испытания на растяжение». По результатам испытаний построена диаграмма « σ - ϵ » для арматуры; среднее значение временного сопротивления испытанной арматуры составило $\sigma_b = 708$ МПа. По полученным результатам испытанная арматура относится к классу А500С в соответствии с требованиями ГОСТ Р 2544-2006 «Прокат арматурный свариваемый периодического профиля классов А500С и В500С для армирования железобетонных конструкций. Технические условия».

Фактическая разрушающая нагрузка, полученная по результатам испытаний опытных образцов, составила: для образца с квадратной колонной $P_{ult} = 272$ кН, для образца с прямоугольной колонной $P_{ult} = 328$ кН. На рис. 3 показана характерная пирамида продавливания на растянутой грани плиты опытных образцов.

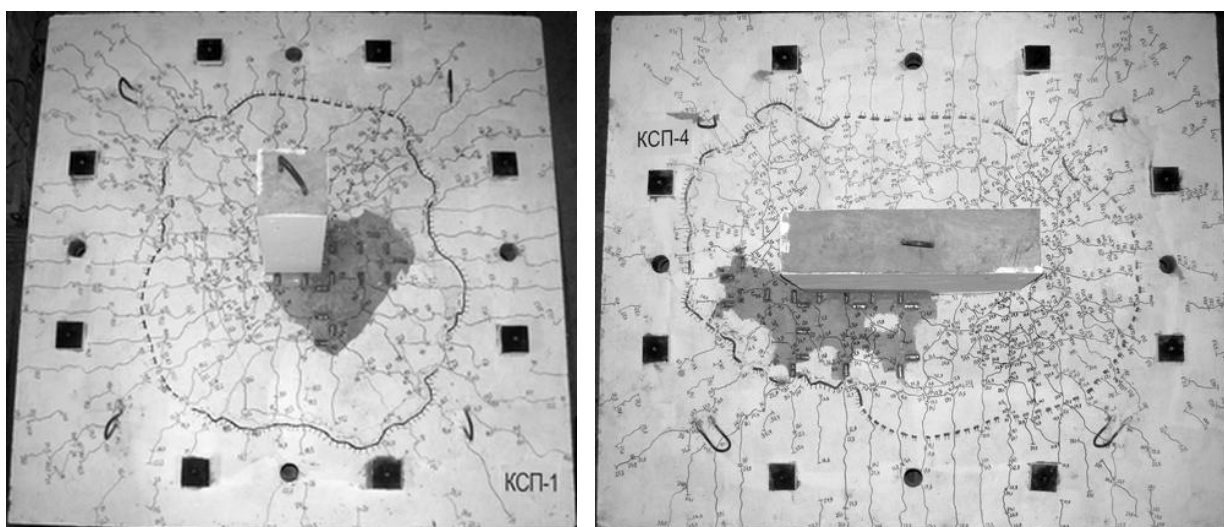


Рис. 3 – Вид образцов после испытания

Расчетное значение разрушающей нагрузки согласно СП 63.13330.2018 составило:

- для образца с квадратной колонной $P_{calc} = 255$ кН;

$$\frac{P_{ult}}{P_{calc}} = \frac{272}{255} = 1,07;$$

- для образца с прямоугольной колонной $P_{calc} = 457$ кН;

$$\frac{P_{ult}}{P_{calc}} = \frac{328}{457} = 0,72;$$

Расчетное значение разрушающей нагрузки согласно формуле (2) для образца с прямоугольной колонной составило: $P_{calc} = 332$ кН.

$$\frac{P_{ult}}{P_{calc}} = \frac{328}{332} = 0,99;$$

Анализ результатов испытаний показывает, что расчетная модель работы железобетонной плиты на продавливание, реализованная в СП 63.13330.2018, дает хорошее соответствие с опытными результатами, когда площадка нагружения имеет квадратную или близкую к ней форму сечения. Для прямоугольной колонны с соотношением сторон поперечного сечения равным 4 опытные значения прочности при продавливании меньше расчетных на 28%. Превышение расчётных значений над опытными величинами разрушающих нагрузок обусловлено несоответствием расчётной модели, принятой в нормах проектирования СП 63.13330.2018, фактическому напряженно-деформированному состоянию плоской железобетонной плиты при продавливании прямоугольной колонной (колонной-пилоном).

В то же время, расчет по формуле (2), которая используется в нормах ACI-318 [5] и учитывает соотношение сторон колонны (площадки нагружения), показывает хорошее соответствие с результатами испытаний.

Значительное превышение расчетного значения над опытным, отмеченное при испытаниях, указывает на снижение конструктивной безопасности подобных узлов сопряжения в монолитном безбалочном

каркасе и требует детального исследования напряженно – деформированного состояния плиты на участке примыкания к колонне в зависимости от конструктивных параметров, в том числе от формы ее поперечного сечения.

Литература

1. Кашина И.В., Закиева Н.И., Калиберда Д.В., Ким К.А., Ливинский Д.Р. К вопросу разработки конструктивных схем каркасов высотных монолитных железобетонных зданий // Инженерный вестник Дона, 2020, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2020/6280/.

2. Задорожная А.В., Трофимова В.М., Аксёнов Н.Б. Особенности использования BIM технологий при расчёте железобетонных конструкций // Инженерный вестник Дона, 2019, №7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2019/6098/.

3. Белостоцкий А.М., Карпенко Н.И., Акимов П.А., Сидоров В.Н., Карпенко С.Н., Петров А.Н., Кайтуков Т.Б., Харитонов В.А. О методах расчета напряженно-деформированного состояния и на устойчивость к прогрессирующему обрушению пространственных плитнооболочечных железобетонных конструкций с учетом физической нелинейности, трещинообразования и приобретаемой анизотропии // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2018. Т.14. № 2. pp. 30–47.

4. Кабанцев О.В., Песин К.О., Карлин А.В. Анализ напряженно-деформированного состояния плитных конструкций в приопорных зонах // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2017. Т.13. № 1. pp. 55–62.

5. ACI 318-19. Building Code Requirements for Structural Concrete. Farmington Hills. 430 p.

6. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н. Практическая методика расчета железобетонных плит на продавливание по различным схемам // Бетон и железобетон. 2012. № 5. С. 10–16.

7. Тамразян А.Г., Звонов Ю.Н. К оценке надежности железобетонных плоских безбалочных плит перекрытий на продавливание при действии сосредоточенной силы в условиях высоких температур // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 7. С. 24–28.

8. Болгов А.Н., Иванов С.И., Кузеванов Д.В., Сокуров А.З. О расчете несущей способности плоских железобетонных плит перекрытий // Вестник НИЦ Строительство. 2017. № 4 (15). С.37-48.

9. Filatov V.B. Experimental investigation of stress-strain conditions in punching zone of flat slabs. RSP 2017 – XXVI R-S-P Seminar 2017 Theoretical Foundation of Civil Engineering. MATEC Web of Conf. 2017. Vol. 117. P. 00045.

10. Трёкин Н.Н., Пекин Д.А. Скрытые металлические капители безбалочных монолитных перекрытий // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 7. С. 17–20.

11. Filatov V.B., Galyautdinov Z.Sh. Experimental research of punching shear strength on reinforced concrete test samples // В сб: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 451. P. 012061.

12. Muttoni A. Punching Shear Strength of Reinforced Concrete Slabs without Transverse Reinforcement. ACI Structural Journal. 2008. Vol. 105. No 4. Pp. 440–450.

13. Broms C. E. Punching of Flat Plates – A Question of Concrete Properties in Biaxial Compression and Size Effect. ACI Structural Journal. 1990. Vol. 87. № 3. Pp. 292–304.

14. Sagaseta J., Tassinari L., Ruiz M., Muttoni A. Punching of flat slabs supported on rectangular columns. Engineering Structures. 2014. № 77. Pp. 17–33.

15. Susanto T., Cheong H.K., Kuang K.L., Geng J.Z. Punching Shear Strength of Slabs with Openings and Supported on Rectangular Columns. ACI Structural Journal. 2004. Vol. 101. № 5. Pp. 678–687.

References

1. Kashina I.V., Zakieva N.I., Kaliberda D.V., Kim K.A., Livinskiy D.R. Inzhenernyj vestnik Dona. 2020. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2020/6280/.
 2. Zadorozhnaya A.V., Trofimova V.M., Aksionov N.B. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019. №7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2019/6098/.
 3. Belostotsky A.M. A.M., Karpenko N.I., Akimov P.A., Sidorov V.N., Karpenko S.N., Petrov A.N., Kaytukov T.B., Kharitonov V.A. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2018. Vol.14. № 2. Pp. 30–47.
 4. Kabantsev O.V., Pesin K.O., Karlin A.V. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2017. Vol.13. № 1. Pp. 55–62.
 5. ACI 318-19. Building Code Requirements for Structural Concrete. Farmington Hills. 430 p.
 6. Karpenko N.I., Karpenko S.N. Beton i zhelezobeton. 2012. No 5. Pp. 10-16.
 7. Tamrazyan A.G., Zvonov Yu.N. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2016. No 7. Pp. 24-28.
 8. Bolgov A.N., Ivanov S.I., Kuzevanov D.V., Sokurov A.Z. Vestnik NIC Stroitel'stvo. 2017 No 4 (15). Pp. 37-48.
 9. Filatov V.B. Experimental investigation of stress-strain conditions in punching zone of flat slabs. RSP 2017 – XXVI R-S-P Seminar 2017 Theoretical Foundation of Civil Engineering. MATEC Web of Conf. 2017. Vol. 117. P. 00045.
 10. Trekin N. N., Pekin D. A. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2014 No 7. Pp 17–20.
 11. Filatov V.B., Galyautdinov Z.Sh. Experimental research of punching shear strength on reinforced concrete test samples. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 451. P. 012061.
 12. Muttoni A. ACI Structural Journal. 2008. Vol. 105. № 4. Pp. 440–450.
-



13. Broms C. E. ACI Structural Journal. 1990. Vol. 87. № 3. Pp. 292–304.
14. Sagaseta J., Tassinari L., Ruiz M., Muttoni A. Engineering Structures. 2014. № 77. Pp. 17–33.
15. Susanto T., Cheong H.K., Kuang K.L., Geng J.Z. ACI Structural Journal. 2004. Vol. 101. № 5. Pp. 678–687.