

Определение фактического угла наклона боковых граней пирамиды продавливания для плит большой толщины по результатам экспериментальных исследований

С.В. Трофимов

Национально исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация: В статье представлены результаты экспериментальных исследований по определению углов наклона к горизонтали боковых граней пирамиды продавливания для толстых железобетонных плит. Установлено, что для плит толщиной 600 мм средний угол наклона к горизонтали боковых граней пирамиды продавливания составляет $\approx 34,0^\circ$. Также в статье было отмечено, что величина угла наклона меняется в зависимости от коэффициента армирования плиты. Полученные данные показывают, что фактическое напряжённо-деформированное состояние «толстых» плит при продавливании значительно отличается от нормативной модели. Это требует внесения изменений в нормативную методику расчёта прочности таких конструкций при продавливании.

Ключевые слова: продавливание, железобетон, толстые плиты, угол наклона трещин, экспериментальные исследования, нормативные методики, размерный эффект, вклад продольного армирования.

Введение

В практике проектирования монолитных железобетонных зданий и сооружений определение прочности на продавливание плитных конструкций представляет собой в ряде случаев непростую инженерную задачу [1, 2]. При этом особую сложность при проектировании монолитных железобетонных плитных конструкций представляет оценка несущей способности при продавливании трансферных плит, которые являются критически важными элементами конструктивной схемы высотных зданий. Согласно опубликованной международной федерацией по железобетону (International Federation for Structural Concrete (*fib*), Switzerland, Lausanne) базе данных о ранее выполненных экспериментальных исследованиях по определению прочности плит без устройства поперечного армирования на продавливание (а также с учетом исследований плит, выполненных Коровиным Н.Н. [3] и Su-Min Kang [4]) из 482 испытанных плит (Рис. 1) только 1,86% (9 образцов)

имели толщины $h = 400...500$ мм, и менее 1,0 % (4 образца) превышали толщину 500 мм.

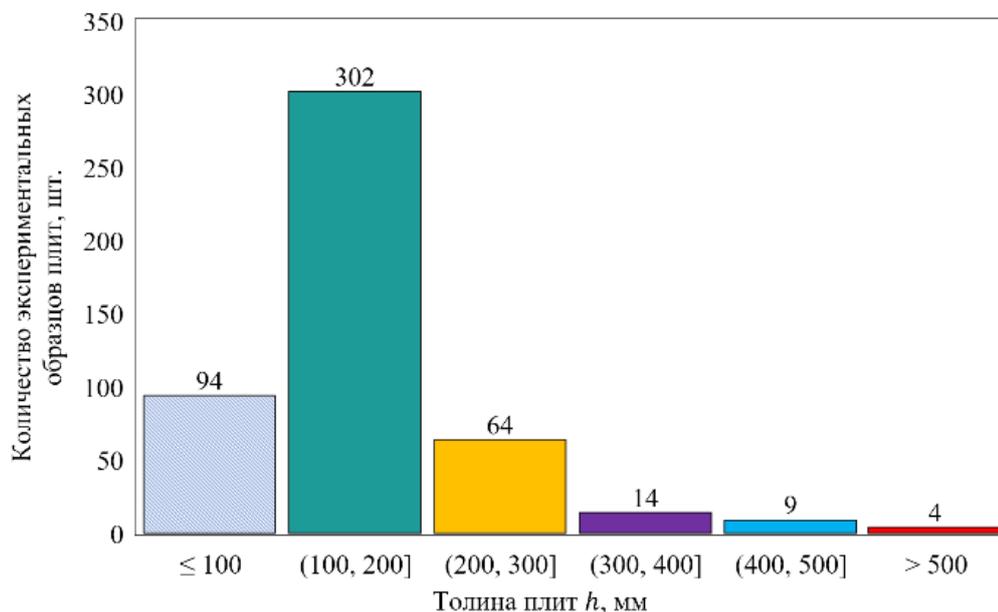


Рис. 1. – Данные о количестве экспериментальных образцов плит разных размеров, испытанных во всём мире, из открытой базы данных *fib* с учетом работ [3, 4]

Однако существующие нормативные расчетные методики, используемые при определении несущей способности на продавливание плитных конструкций, основаны преимущественно на результатах испытаний «тонких» плит [5, 6], которые составляют основной массив экспериментальных данных [7]. Это приводит к тому, что при проектировании плитных конструкций, существенно отличающихся по геометрическим параметрам от большинства экспериментальных образцов, расчетные нормативные формулы, принятые в СП 63.13330.2018, EN 1992 Eurocode 2, Model Code 2010 и ACI 318-19, могут прогнозировать несущую способность для «толстых» плит существенно отличную от реальных величин.

Так, например, при определении несущей способности на продавливание плиты толщиной 1000 мм ($\mu_s = 0,56$ %, размеры квадратной колонны 400×400 мм, $f_c = 25$ МПа, $R_{bt} = 1,75$ МПа) без устройства поперечного

армирования прочность при продавливании по разным нормативным подходам составляет согласно: СП 63.13330.2018 – $F_{b,ultСП63} = 9009,7$ кН; EN 1992 Eurocode 2 – $F_{b,ultEC2} = 8225,0$ кН; АСІ 318-19 – $F_{b,ultACI} = 5479,0$ кН; СП 63.13330.2018 с учетом предлагаемого Коровиным Н.Н. [3] корректирующего коэффициента K – $F_{b,ult} = 6841,4$ кН. Подобные существенные расхождения результатов, полученных по разным расчетным методикам, способны вызвать критические ошибки при проектировании монолитных железобетонных плитных конструкций.

Важным фактором, определяющим действительные величины прочности на продавливание «толстых» железобетонных плит без поперечного армирования, является форма пирамиды продавливания, которая образуется наклонными трещинами, возникающими при действии продавливающих нагрузок.

Таким образом, определение схемы формирования наклонных трещин с уточнением действительных углов их наклона к горизонтали является важной и актуальной задачей.

На базе Лаборатории натуральных испытаний Научно-исследовательского института экспериментальной механики НИУ МГСУ были проведены экспериментальные исследования двух серий плит толщиной 600 мм без устройства поперечного армирования на продавливание при действии статической нагрузки с целью определения фактических значений разрушающих нагрузок, а также углов наклона к вертикали боковых граней фигуры (пирамиды) разрушения при продавливании.

Материалы и методы

Для экспериментальных образцов плит двух серий принимались следующие размеры: $2440 \times 2440 \times 600$ (h) мм. Во всех случаях опирание образцов выполнялось по центру на стальную колонну сечением 400×400 мм. Армирование плит осуществлялось при помощи верхних и нижних

продольных сеток, устройство поперечного армирования не предусматривалось. При этом для образцов первой серии (принятая маркировка ККТ_1) верхнее (растянутое) продольное рабочее армирование было выполнено из стержней $\varnothing 28$ мм с шагом $s = 100$ мм ($\mu_s = 1,12$ %), а для образцов плит второй серии (принятая маркировка ККТ_2) также из стержней $\varnothing 28$ мм, но с шагом $s = 200$ мм ($\mu_s = 0,56$ %). Нижнее продольное рабочее армирование было принято из стержней $\varnothing 12$ мм с шагом 100 мм для образцов первой серии (марки ККТ_1) и 200 мм для плит второй серии (марки ККТ_2). Нагружение образцов плит выполнялось при помощи одновременного действия 8 гидравлических домкратов, которые во всех случаях устанавливались по кругу на верхней горизонтальной грани плит. При этом нагружение образцов выполнялось поэтапно ступенями, каждая из которых не превышала $0,1 \cdot P_{раз}$, где $P_{раз}$ – ожидаемая разрушающая нагрузка.

После испытаний плит на продавливание образцы были распилены дисковой пилой, что позволило детально изучить схему трещинообразования и определить истинный угол наклона наклонных трещин, образовавших пирамиду разрушения.

Результаты и выводы

Момент образования на растянутой грани тангенциальных и радиальных трещин в процессе нагружения образцов, вызванных изгибом плит, не фиксировался, поскольку из-за особенностей конструкции экспериментального стенда, состоящего из 8 стальных П-образных рам и гидравлических домкратов, доступ к образцам был ограничен. Однако было установлено, что переход радиальных трещин с верхней грани на боковые осуществлялся на начальных этапах нагружения при действии статической нагрузки, равной $0,2 \dots 0,3 \cdot P_{раз}$.

Во всех случаях момент разрушения экспериментальных образцов сопровождался следующими процессами:

– Возникновением радиальных, тангенциальных и диагональных трещин на растянутой поверхности плит со значительной шириной раскрытия (в ряде случаев более 5 мм) на расстоянии $\approx 200\dots 400$ мм от края образцов.

– Выкалыванием сжатого бетона в окрестности опирания образцов плит на стальную колонну, вызванным вертикальным смещением продавливающего штампа относительно нижней поверхности плиты.

По результатам резки образцов двух серий был определен внутренний характер образования как изгибных трещин, так и критических наклонных трещин, формирующих боковые грани пирамиды продавливания.

Установлено, что во всех плитах радиальные и тангенциальные трещины, вызванные изгибом образцов, развивались от растянутой поверхности к сжатой, при этом их угол наклона к вертикали возрастал по мере удаления от центра плиты. В общем случае расстояние между трещинами соответствовало шагу продольной арматуры в верхней зоне, однако ближе к нижней грани образцов оно уменьшалось (Рис. 2).

Все образцы демонстрируют типичный характер разрушения плит при продавливании без устройства поперечного армирования, который определяется преимущественно наклонной критической трещиной, направленной от края колонны к верхней арматуре. Определено, что фактический угол наклона к горизонтали критических наклонных трещин, формирующих боковые грани пирамиды продавливания, является переменным по толщине плиты. Так, угол наклона к горизонтали трещин, формирующих полосу сдвига в окрестности опирания образцов на колонну, составляет от 50° до 70° (Рис. 3). Для центральной части плит этот угол составляет от 25° до 35° (Рис. 2).

В результате выполненных экспериментов было установлено, что для плит большой толщины средний угол наклона к горизонтали боковых граней

пирамиды продавливания составляет $\approx 34,0^\circ$, что соответствует ранее выполненным исследованиям [8, 9].

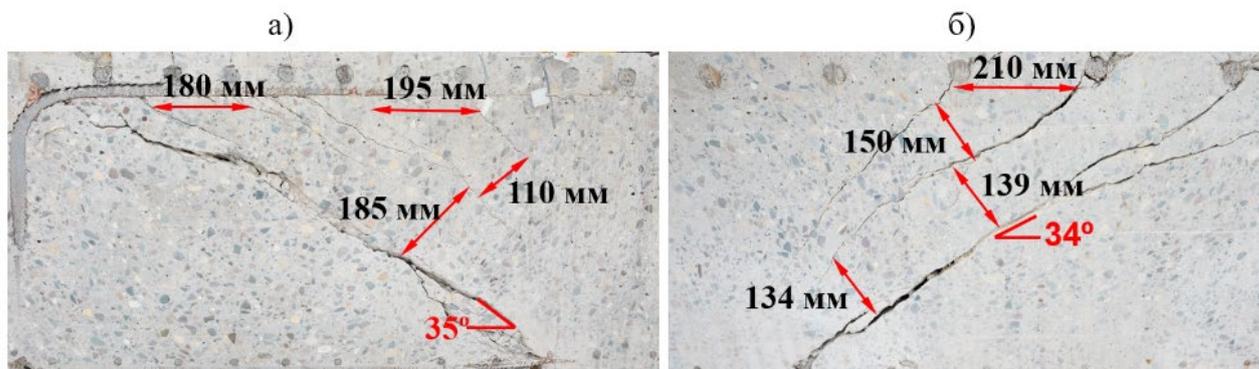


Рис. 2. – Фактическое расстояние между трещинами и углы наклона к горизонтали боковых граней фигуры разрушения для образцов плит марки: а) ККТ_1 ($\mu_s = 1,12 \%$); б) ККТ_2 ($\mu_s = 0,56 \%$)

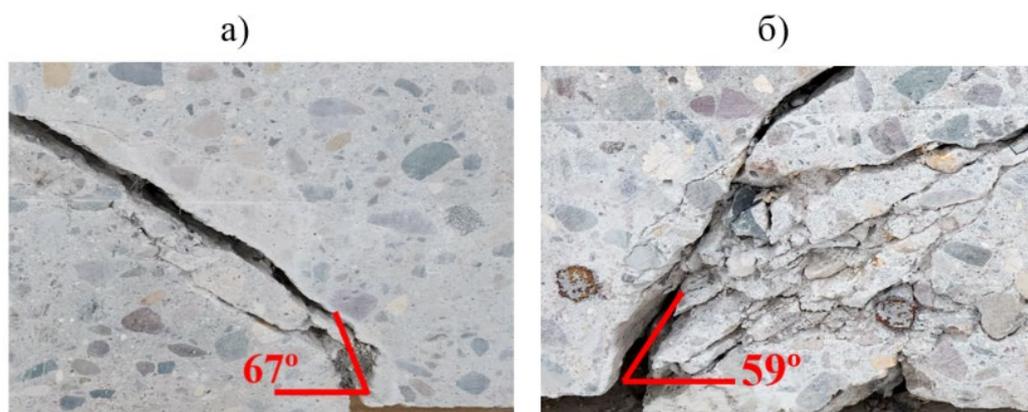


Рис. 3. – Характер разрушения бетона в окрестности опирания плит на колонну образцов плит: а) второй серии; б) первой серии

При этом величина угла наклона несколько меняется в зависимости от коэффициента армирования плиты. Полученные данные показывают, что фактическое напряжённно-деформированное состояние «толстых» плит при продавливании значительно отличается от нормативной модели. Это требует внесения изменений в нормативную методику расчёта прочности таких конструкций при продавливании. Также следует отметить, что при выполнении конечно-элементного анализа [10] для получения корректных результатов необходимо задавать шаг трещин в бетоне. Проведённые

исследования позволили получить необходимые данные для построения таких численных моделей.

Литература

1. Тамразян А.Г., Манаенков И.К. К расчету плоских железобетонных перекрытий при локальном приложении нагрузки // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. 2017. №1. С. 156-161.
2. Манаенков И.К. Определение граничных значений толщины плоских железобетонных перекрытий из условия продавливания // Инженерный вестник Дона. 2025. №6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2025/10162.
3. Коровин Н.Н., Голубев А.Ю. Продавливание толстых железобетонных плит // Бетон и железобетон. 1989. №11. С. 20-23.
4. Kang S.M., NA S.J., Hwang H.J. Two-way shear strength of reinforced concrete transfer slab-column connections // Engineering Structures. 2021. №231. pp. 1-11.
5. Трекин Н.Н., Крылов В.В., Трофимов С.В., Евстафьева Е.Б., Саркисов Д.Ю. Экспериментально-теоретическое исследование прочности плит на продавливание // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. №8. С. 1006-1014.
6. Алексейцев А.В., Антонов М.Д. Сопrotивляемость прогрессирующему разрушению монолитных каркасов зданий при локальных повреждениях узлов от продавливания // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. №9. С. 1454-1468.
7. Манаенков И.К. Сравнительный анализ результатов расчета плоских железобетонных плит на продавливание // Инженерный вестник Дона. 2022. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7480.
8. Bocklenberg L., Mark P. Thick slab punching with symmetry reductions // Structural Concrete. 2020. №21. pp. 875-889.
9. Simoes J.T., Fernandez R.M., Muttoni A. Validation of the critical shear crack theory for punching of slabs without transverse reinforcement by means of a refined mechanical model // Structural Concrete. 2018. №19. pp. 191-216.

10. Бударин А.М., Ушаков О.Ю., Сабитов Л.С. Численное исследование влияния масштабного эффекта на продавливание толстых железобетонных плит // Академический вестник УралНИИпроект РААСН, №1 (64). 2025. С. 72-79.

References

1. Tamrazyan A.G., Manaenkov I.K. Bezopasnost' stroitel'nogo fonda Rossii. Problemy i resheniya. 2017. №1. pp. 156-161.
2. Manaenkov I.K. Inzhenernyj vestnik Dona. 2025. №6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2025/10162.
3. Korovin N.N., Golubev A.Yu. Beton i zhelezobeton. 1989. №11. pp. 20-23.
4. Kang S.M., NA S.J., Hwang H.J. Engineering Structures. 2021. №231. pp. 1-11.
5. Trekin N.N., Sarkisov D.Ju., Trofimov S.V., Krylov V.V., Evstaf'eva E.B. Vestnik MGSU. 2021. Vol. 16. №8. pp. 1006-1014.
6. Aleksejcev A.V., Antonov M.D. Vestnik MGSU. 2024. Vol. 19. №9. pp. 1454-1468.
7. Manaenkov I.K. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7480.
8. Bocklenberg L., Mark P. Structural Concrete. 2020. №21. pp. 875-889.
9. Simoes J.T., Fernandez R.M., Muttoni A. Structural Concrete. 2018. №19. pp. 191-216.
10. Бударин А.М., Ушаков О.Ю., Сабитов Л.С. Академический вестник УралНИИпроект. №1 (64). 2025. pp. 72-79.

Дата поступления: 7.05.2025

Дата публикации: 29.06.2025