

УДК 624.012.45.046

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ПРОЧНОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ ПРИ ПРОДАВЛИВАНИИ

© 2014 В.Б. Филатов, Е.П. Бубнов, А.К. Алексеев, М.А. Брусков,
З.Ш. Галяутдинов, А.Г. Пройдин

Самарский государственный архитектурно-строительный университет

Поступила в редакцию 02.12.2014

В статье рассмотрены и проанализированы расчетные модели, принятые в отечественных и зарубежных нормативных документах для расчета прочности плоских железобетонных плит при продавливании. Показано, что учет конструктивных параметров (соотношение сторон сечения колонны, высота сечения плиты и процент армирования) в расчетных зависимостях для определения прочности железобетонной плиты при продавливании позволяет повысить конструктивную безопасность проектных решений.

Ключевые слова: *плоская железобетонная плита, колонна, продавливание, расчетная модель*

В 1913 г. Тэлботом [1] предложен метод определения прочности железобетонных плит при продавливании (применительно к фундаментам) путем сравнения расчетных значений напряжений среза (касательных напряжений) с допустимыми значениями, которые определяются как характеристики физико-механических свойств бетона. Расчетные значения напряжений среза предлагалось вычислять путем деления продавливающего усилия на площадь поверхности расчетного контура, перпендикулярного плоскости фундаментной плиты. В дальнейшем, основываясь на предложенном методе, были представлены различные модификации расчета, в которых рассматривались различные положения расчетного контура, учитывалась высота сечения плиты и распределение напряжений среза (касательных напряжений) на расчетном контуре. Модификации метода, предложенного Тэлботом, сводились к введению эмпирических коэффициентов, учитывающих процент продольного армирования плиты, высоту сечения плиты, геометрическую форму сечения колонны и т.д. Киннунен и Нилендер [2] развивали другой подход к определению прочности при продавливании, основанный на наблюдениях механизма разрушения. В их модели принято, что

сопротивление продавливанию складывается из сопротивления сегментов плиты, расположенных за конусом продавливания и сопротивления сжатой усеченной конической оболочки, которая расположена от грани колонны до вершины трещины. Сегменты плиты, разделенные радиальными трещинами и расположенные за конусом продавливания, рассматриваются как абсолютно жесткие тела (рис. 1). Разделенные радиальными трещинами сегменты плиты поворачиваются вокруг вершины трещины и передают усилия на сжатую усеченную коническую оболочку (рис. 2).

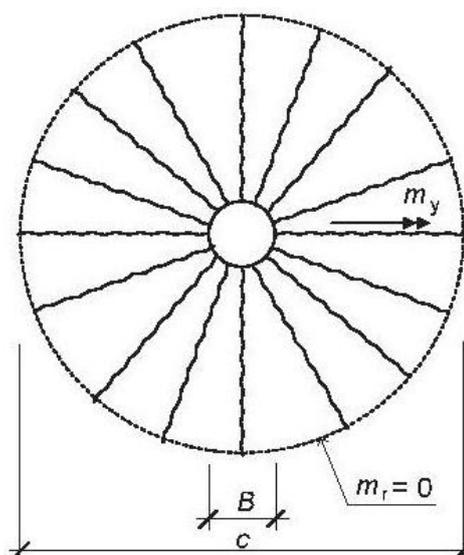


Рис. 1. Сегменты плиты, разделенные радиальными трещинами

Филатов Валерий Борисович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций.
E-mail: vb_filatov@mail.ru

Бубнов Евгений Павлович, магистр

Алексеев Андрей Константинович, студент

Брусков Марк Анатольевич, студент

Галяутдинов Зульфат Шавкатович, студент

Пройдин Алексей Геннадьевич, студент

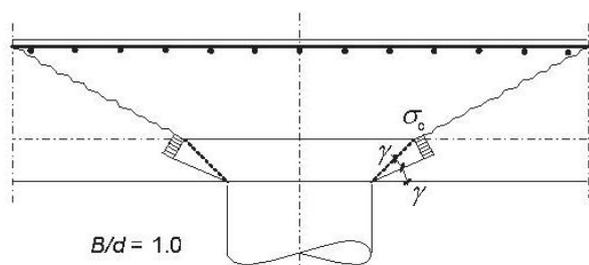


Рис. 2. Радиальные напряжения в сжатой зоне

Несущая способность узла на продавливание является функцией угла поворота сегментов плиты. Критерий разрушения состоит в ограничении наклонных сжимающих напряжений радиального направления и деформаций сжатия в тангенциальном направлении в области усеченной конической оболочки. Использование этого метода применительно к результатам испытаний опытных образцов выявило существенное расхождение расчетных и опытных значений величин напряжений и деформаций и позволило заключить, что предложенный метод не обладает большей точностью по сравнению с предыдущим. Тем не менее, предложенная авторами [2] расчетная модель получила дальнейшее развитие в работах [3, 4].

До недавнего времени в нормативных документах различных стран [5-7] преобладала расчетная модель, предложенная в [1], в соответствии с которой разрушение происходит по поверхности так называемого «тела продавливания», вследствие преодоления предела прочности бетона растяжению (срезу). В качестве «тела продавливания» рассматривается геометрическая фигура, форма и размеры которой определяются формой и размерами площадки нагружения, а также углом наклона прямолинейной образующей, соединяющей периметр площадки нагружения с противоположной гранью плиты. Угол наклона граней пирамиды продавливания является одним из варьируемых параметров в различных методиках расчета. Несомненным преимуществом модели является ее простота, но в то же время, являясь сугубо эмпирической, она не позволяет дать физическое истолкование влияния различных факторов на прочность рассматриваемого сечения. Эти факторы (процент продольного армирования плиты, толщина плиты, геометрическая форма колонны и т.д.) приходится учитывать путем введения эмпирических коэффициентов.

Методика, основанная на предложениях авторов [2-4], имела значительно меньшее применение в связи с ее большей сложностью в практике проектирования. Ее положения были частично включены в нормы проектирования Швеции и Швейцарии. Однако в проекте новых

европейских норм *Model Code 2010* методика расчета на продавливание практически полностью основана на предложениях автора [4], в частности, использованы его предложения по определению углов поворота плиты на опоре. Для вычисления углов поворота плиты нормы предлагают четыре уровня аппроксимации – от линейно-упругой модели до нелинейного расчета конструктивной системы с учетом трещинообразования.

На значительное усложнение расчета по новым европейским нормам указывают авторы [8], предложившие единый критерий, позволяющий проверять прочность плиты на продавливание при различных углах наклона граней пирамиды продавливания и находить минимальное значение прочности, в том числе при действии изгибающих моментов. Модель, принятая в нормах проектирования [5-7] обеспечивает хорошее соответствие расчетных и опытных значений при продавливании плоских плит, если площадка нагружения имеет круглую или квадратную форму, то есть, когда можно допустить, что распределение напряжений на каждой грани расчетного контура продавливания имеет однотипный характер. При продавливании плиты колонной прямоугольной формы сечения расчетные значения разрушающих нагрузок удовлетворительно соответствуют опытным данным, если отношение сторон колонны (площадки нагружения) не превышает 2 [9]. В противном случае расчетные значения превышают опытные, что свидетельствует о несоответствии предпосылок расчетной модели фактическому характеру работы при продавливании монолитного узла сопряжения прямоугольной колонны и плоской плиты перекрытия.

Для приведения в соответствие расчетных и опытных данных используются разные способы. В нормах проектирования [6] применяется поправочный коэффициент, который понижает величину периметра расчетного контура, если соотношение сторон колонны превышает 2. Формула для определения величины поправочного коэффициента предложена на основании результатов выполненных ранее экспериментальных исследований [9]. В европейских нормах [7] с этой же целью предлагается схема для определения периметра расчетного контура, использование которой позволяет исключать из расчета часть его длины вдоль большей грани колонны.

В российских нормах [5] рекомендации по учету соотношения сторон колонны (геометрической формы площадки нагружения) отсутствуют. Между тем, отсутствие подобных рекомендаций, как показывают результаты

экспериментальных исследований [10], в отдельных случаях может приводить к значительному завышению расчетной оценки прочности при продавливании узлов монолитного безбалочного каркаса. Предложения по корректировке расчетной методики норм [5] представлены в работах [11, 12]. Как показывают результаты сравнительного анализа расчетных и опытных значений прочности при продавливании, представленные в [11, 12], предлагаемая корректировка дает возможность расчетной оценки влияния геометрической формы сечения колонны на прочность плиты при продавливании, что позволяет повысить конструктивную надежность и безопасность проектных решений. Результаты экспериментальных исследований влияния на прочность железобетонных плит при продавливании таких факторов как процент продольного армирования и высота сечения плиты представлены в работе [4].

Анализ результатов, приведенных в [4], показывает, что с увеличением высоты сечения плиты и уменьшением процента продольного армирования несущая способность железобетонной плиты на продавливание снижается. Методика расчета, принятая в [6], позволяет учитывать высоту сечения плиты, но не учитывает процент продольного армирования, поэтому существенно (до 35%) переоценивает прочность плиты на продавливание при малых процентах армирования ($\mu < 0,5$) и недооценивает (до 50%) при больших ($\mu > 1,5$). Та же тенденция характерна и для норм [5], но, поскольку не учитываются оба конструктивных параметра, переоценка несущей способности плиты на продавливание при малых процентах армирования более значительна. Наилучшее соответствие расчетных и опытных значений (расхождение не превышает 10%) обеспечивают нормы [7], поскольку в структуре расчетных зависимостей присутствуют эмпирические коэффициенты, учитывающие как высоту сечения плиты, так и процент продольного армирования. Недостаточное соответствие расчетных и опытных значений прочности обусловлено эмпирической природой расчетных зависимостей норм [5-7] по расчету прочности плит на продавливание. Эмпиризм расчетных зависимостей является закономерным следствием значительных трудностей, возникающих при теоретическом исследовании анизотропного материала (железобетона) при объемном напряженном состоянии.

Помимо рассмотренных конструктивных параметров, которые задаются при проектировании, существует ряд других факторов, влияющих на прочность при продавливании плиты монолитного безбалочного каркаса (уровень

сжимающих напряжений в колонне от эксплуатационных нагрузок, величина изгибающего момента, передаваемого колонной на плиту, воздействие на каркас горизонтальных усилий и пр.). Учет этих факторов на основе эмпирической модели является сложной задачей ввиду большого количества параметров в условиях неопределенности относительно степени их влияния. Более перспективным представляется подход к расчету на основе полуэмпирических моделей [3, 4, 8], позволяющий оценить влияние отдельных факторов на напряженное состояние и прочность узла продавливания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Talbot, A.N.* Reinforced Concrete Wall Footings and Column Footings // University of Illinois Engineering Experiment Station. 1913. Bulletin № 67. 114 p.
2. *Kinnunen, S.* Punching of Concrete Slabs without Shear Reinforcement / *S. Kinnunen, H. Nylander* // Transactions of the Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden. 1960. № 158. 112 p.
3. *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. P. 292-304.
4. *Muttoni, A.* Punching Shear Strength of Reinforced Concrete Slabs without Transverse Reinforcement // *ACI Structural Journal*. 2008. Vol. 105, № 4. P. 440-450.
5. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения: СП 63.13330.2012: утв. Министерством рег. развития Рос. Федерации 29.12.11: введ в действие с 01.01.13. – М.: ФАУ «ФЦС», 2012. 165 с.
6. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary: ACI 318 – 05, ACI 318R – 05. Farmington Hills. USA. 2005. 430 p.
7. Eurocode 2. Design of Concrete Structures. Part 1. General Rules and Rules for Buildings: EN 1992 – 1:2001. Brussels. 2002. 230 p.
8. *Карпенко, Н.И.* Практическая методика расчета железобетонных плит на продавливание по различным схемам / *Н.И. Карпенко, С.Н. Карпенко* // Бетон и железобетон. 2012. № 5. С. 10-16.
9. ACI-ASCE Committee 426. The Shear Strength of Reinforced Concrete Members. Proceedings. ASCE. V. 100. № ST8. Aug. 1974. P. 1543-1591.
10. *Susanto, T.* Punching Shear Strength of Slabs with Openings and Supported on Rectangular Columns / *T. Susanto, H.K. Cheong, K.L. Kuang, J.Z. Geng* // *ACI Structural Journal*. 2004. V. 101, № 5. P. 678-687.
11. *Филатов, В.Б.* Силовое сопротивление железобетонных монолитных плоских плит перекрытий при продавливании колоннами прямоугольного сечения // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14, № 4(5) С. 1322-1324.
12. *Филатов, В.Б.* Совершенствование нормативной методики расчета на продавливание плоских железобетонных плит // Вестник гражданских инженеров. 2013. № 5 (40). С. 80-84.

ANALYSIS OF INFLUENCE OF DESIGN PARAMETERS ON STRENGTH REINFORCED CONCRETE SLABS AT PUNCHING

© 2014 V.B. Filatov, E.P. Bubnov, A.K. Alekseev, M.A. Bruskov,
Z.Sh. Galyautdinov, A.G. Proydin

Samara State University of Architecture and Civil Engineering

The article discusses and analyzes design models adopted in domestic and foreign design codes for calculating the strength of flat concrete slabs at punching. It is shown that the inclusion of design parameters (aspect ratio of the column cross-section, the height of the plate section and the percentage of reinforcement) in the calculated dependencies for determining the strength of a reinforced concrete slab at punching improves the structural safety of the design decisions.

Key words: *reinforced concrete flat plate, column, punching, design model*

*Valeriy Filatov, Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Building
Contructions. E-mail: vb_filatov@mail.ru
Evgeniy Bubnov, Master
Andrey Alekseev, Student
Mark Bruskov, Student
Zulfat Galyautdinov, Student
Aleksey Proydin, Student*