

ПРОДАВЛИВАНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ФУНДАМЕНТНЫХ ПЛИТ

Родин¹ С.В., Меннанов² Э.М., Богуцкий³ Ю.Г., Калафатов⁴ Д.А.ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им В.И. Вернадского»,
Институт «Академия строительства и архитектуры»,
295493, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Киевская, 181E-mail: ¹sv_rodin@mail.ru, ²mennanov.elmar@mail.ru, ³bogutskiyyg@mail.ru, ⁴jafer90@mail.ru

Аннотация. В статье приведено объяснение вторичного характера образования пирамиды продавливания как следствие истинного хрупкого разрушения плитных железобетонных конструкций – дробления, среза или смятия бетона с учетом местных напряжений и концентрации изгибающих моментов, а для фундаментов дополнительного перераспределения контактных напряжений в грунтовом основании и поперечных сил, что позволяет с достаточной обоснованностью свести всё разнообразие видов хрупкого разрушения с образованием различных форм пирамид продавливания к трем – дроблению, срезу и смятию бетона. Выполнены экспериментальные исследования с крупномасштабными железобетонными моделями фундаментов на песчаном основании, которые позволили изучить параметры совместной работы фундамента и грунта, и установить геометрические и прочностные факторы (вылет консолей, высота плиты фундамента, армирование, прочность бетона), играющие важную роль в формировании процесса хрупкого разрушения фундамента в виде продавливания.

Предмет исследования: напряженно-деформированное состояние фундаментов при хрупком разрушении в виде продавливания.

Материалы и методы: проведены экспериментальные исследования по получению продавливания фундаментных плит, испытано 49 крупномасштабных образцов фундаментных плит размерами 1х1х0,1 м и 29 плит размером 2х2 м высотой сечения от 0,08 м до 0,4 м. Опыты проводили в железобетонном лотке размером 4х4х3(н) м, высота слоя песка составляла 2,2-2,4 м. Силовое оборудование позволяло нагружать фундаментные плиты усилием до 4000 кН, применяемая регистрирующая аппаратура, в том числе специально разработанная для исследований фундаментов, обеспечивала с высокой точностью проводить измерения принятых параметров системы «грунтовое основание-фундамент».

Результаты: проанализированы методы расчета плит на продавливание и направления совершенствованию расчетов хрупкой прочности. Экспериментально изучено влияния основных параметров конструкций фундаментов на песчаном грунтовом основании на хрупкую прочность при продавливании. Обосновано образование различных форм пирамиды продавливания как вторичного процесса разрушения от дробления, среза или смятия бетона, предложены конструктивные решения по уменьшению влияния концентрации напряжений и усилий в приопорной зоне площади нагружения.

Выводы: расчет фундаментов на продавливание по формуле 8.87 СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции» часто не позволяет с достаточной точностью получить значения хрупкой прочности (прочности на продавливание), опытные величины могут значительно превышать расчетные, причем превышение непостоянно. Для фундаментных плит минимально наблюдавшийся коэффициент перед правой частью формулы равен 1,3. Действительным механизмом хрупкого разрушения плит можно считать дробление, срез сжатой зоны и смятие бетона под опорой, с последующими (вторичными) образованиями пирамиды продавливания. В случае дробления сжатой зоны наилучшие результаты дает расчет критического сочетания главных напряжений в приопорной части плиты.

Ключевые слова: продавливание, железобетон, фундамент, перераспределение, основание, грунт, исследование, срез, дробление, смятие.

ВВЕДЕНИЕ

Метод расчета прочности железобетонных плитных конструкций на продавливание основан на предположении об отрыве пирамиды продавливания от плитной части конструкции, при этом прочность на продавливание оценивают как суммарную по боковой поверхности пирамиды в пределах рабочей высоты сечения конструкции [5,9,10,13,20].

Продавливание плит с образованием пирамиды продавливания наблюдалось в опытах при действии нагрузки, распределенной по квадратной, прямоугольной и круглой площадке. Расчетные формулы, как и в СП [13], основаны на определении нагрузки, воспринимаемой при отрыве пирамиды от плиты. Вместе с тем в [10,15] эмпирический коэффициент перед правой частью формулы меняется от 1,0 до 2,5; в [5,9,16,17] отмечено, что на

прочность при продавливании влияет не только бетон, но и арматура; в [5,7] указано, что при переходе от балки к плите наблюдаются переходные формы хрупкого разрушения; при соотношении ширины плиты к ширине площадки передачи нагрузки не менее 7-ми образуются пирамиды продавливания, а при меньших соотношениях наблюдаются переходные формы.

Экспериментальные исследования фундаментов свидетельствуют о наличии запасов прочности в опытных разрушающих нагрузках и их теоретических значениях, определенных в соответствии с положениями норм проектирования. В последнее время выдвинуто значительное количество предложений по уточнению расчета фундаментов по наклонным сечениям и на продавливание, учитывающих специфику их работы совместно с грунтовым основанием, которые отличаются не только математическим

аппаратом, но и подходом к решению проблемы и часто оказываются не корректными.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Проектирование фундаментов требует наиболее точного определения особенностей напряженного состояния системы «грунтовое основание–фундамент». Многочисленные исследования конструкций плитных фундаментов свидетельствуют о значительных запасах прочности в значениях опытных разрушающих нагрузок и их теоретических значений на продавливание, которые описаны в работах Ю.Н.Мурзенко и др. [10], С.И.Политова и др. [16], Н.Н.Коровина, А.В.Ступкина [9], А.С.Залесова, К.Е.Ермуханова [7], А.Н.Тетиора, С.В.Родина [14], А.А.Цесарского [15].

В процессе исследования железобетонных плит и отдельно стоящих фундаментов с учетом упругопластических свойств грунтового основания были предложены методы расчета при действии сосредоточенной нагрузки, нагрузок, распределенных по квадратной, прямоугольной и круглым площадкам [8,10,12,17]. Механизм разрушения фундаментов при продавливании до сих пор не изучен. Подтверждением этому служит несовпадение мнений в различных странах о причинах разрушения и методике расчета. Согласно [13] расчет столбчатых фундаментов на продавливание в России осуществляют в предположении отрыва пирамиды с боковыми гранями, начинающимися у колонны и наклоненными под углом 45°. Аналогичная система принята по нормам США [18]. Расчет на продавливание по нормам ЕКБ [19] выполняют из условия обеспечения прочности на отрыв фигуры, начинающейся у колонны и имеющей сложную конфигурацию, с углом наклона граней, равным 30°. При расчете по нормам выше указанных стран эпюру контактных давлений под подошвой фундамента принимают прямоугольной. Опыты некоторых авторов [8,9,14,15,20] свидетельствуют о наличии значительного запаса прочности фундаментов, влиянии процентов армирования, образования и развития наклонных трещин на несущую способность и других отклонений от принятой системы расчета. В исследованиях [10,16,17] приводятся результаты экспериментальных и теоретических исследований столбчатых фундаментов на продавливание при действии внешней нагрузки без эксцентриситета и с эксцентриситетом. Отмечено, что: процесс трещинообразования начинается с возникновения нормальных трещин в сечениях по коротким граням колонны, а у внецентренно нагруженных фундаментов – по грани колонны со стороны эксцентриситета внешней силы; момент появления нормальных трещин соответствует уровню нагрузки 20-40% разрушающей; высота сжатой зоны бетона в нормальных сечениях по граням колонны превышает высоту сжатой зоны,

рассчитанную по [13]; процесс деформирования и разрушения сопровождается постоянным перераспределением напряжений в бетоне; при нагрузках, близких к разрушающим, напряжения по высоте сжатой зоны выравниваются, как в нормальных, так и в наклонных сечениях, что определяет переход от разрушения по наклонному сечению к изгибному разрушению; конфигурация граней пирамиды продавливания имеет криволинейный характер с углом наклона, меняющимся в широких пределах (10°-83°); размеры конструкции качественно влияют на механизм разрушения, схемы трещинообразования, напряжения в арматуре и бетоне.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В соответствии с требованиями строительных норм Российской Федерации [13] расчет фундаментов на продавливание необходимо производить при действии на них (нормально к плоскости элемента) местных, концентрированно приложенных усилий - сосредоточенных силы и изгибающего момента. При этом расчетное поперечное сечение принимают расположенным вокруг зоны передачи усилий на элемент на расстоянии нормально к его продольной оси.

Расчет элементов на продавливание при действии сосредоточенной силы производят из условия 8.87 [13].

$$F \leq F_{b,ult} , \quad (1)$$

где – предельное усилие, воспринимаемое бетоном:

$$F_{b,ult} = R_{bt} \cdot A_b , \quad (2)$$

где – площадь расчетного поперечного сечения, расположенного на расстоянии $h_0/2$ от границы площади приложения сосредоточенной силы с рабочей высотой сечения h_0 :

$$A_b = U h_0 , \quad (3)$$

где U – периметр контура расчетного поперечного сечения;

h_0 – приведенная рабочая высота сечения, определяемая как среднеарифметическое значение рабочих высот сечений для продольной арматуры двух взаимно перпендикулярных направлений.

Расчет фундаментов на продавливание при совместном действии сосредоточенных силы и изгибающего момента производят из условия

$$\frac{F}{F_{b,ult}} + \frac{M}{M_{b,ult}} \leq 1 , \quad (4)$$

где M – сосредоточенный изгибающий момент, учитываемый при расчете на продавливание;

$F_{b,ult}$, $M_{b,ult}$ – предельные сосредоточенная сила и изгибающий момент, которые могут быть восприняты бетоном в расчетном поперечном сечении при их раздельном действии.

$$M_{b,ult} = R_{bt} \cdot W_b \cdot h_0, \quad (5)$$

где W_b – момент сопротивления расчетного контура поперечного сечения.

Сопротивление продавливанию в соответствии с нормами проектирования стран Евросоюза [19] определяется в зависимости от расчетного периметра u , расположенного на расстоянии $2d$ (d – рабочая высота сечения) от границ зоны передачи нагрузки. При этом считается, что угол наклона боковых граней пирамиды продавливания может варьироваться в зависимости от толщины фундамента, но должен быть не менее $26,6^\circ$. Для центрально нагруженного фундамента продавливающая сила $V_{Ed,red}$ определяется как разность между сосредоточенной вертикальной силой V_{Ed} , передаваемой надфундаментной конструкцией, и вертикальной силой ΔV_{Ed} , вызванной отпором грунта без учета собственного веса фундамента.

$$v_{ed} = V_{Ed,red} / ud, \quad (6)$$

Сопротивление фундамента продавливанию определяется из условия:

$$v_{Rd} = \frac{0,18}{\gamma_c} k (100 \rho f_{ck})^{1/3} \frac{2d}{a} \geq 0,4 f_{ctd} \frac{2d}{a}, \quad (7)$$

где γ_c – коэффициент надежности по бетону;

k – коэффициент, зависящий от соотношения сторон грузовой площади;

f_{ck} – нормативная цилиндрическая прочность бетона на сжатие в возрасте 28 суток;

f_{ctd} – расчетное сопротивление бетона при растяжении;

a – расстояние от низа колонны до контрольного периметра;

ρ – приведенный коэффициент армирования:

$$\rho = \sqrt{\rho_y + \rho_x} \leq 0,02, \quad (8)$$

где ρ_y, ρ_x – коэффициенты армирования сечения вдоль оси y и x , соответственно.

Для внецентренно нагруженных фундаментов:

$$v_{ed} = \frac{V_{Ed,red}}{ud} \left[1 + k \frac{M_{ed} u}{V_{Ed,red} W} \right], \quad (9)$$

где M_{ed} – изгибающий момент;

W – момент сопротивления контрольного периметра.

В соответствии с требованиями Американских строительных норм [18] расчет фундаментов на продавливание необходимо выполнять по трем условиям:

$$V_u \leq \begin{cases} \left(2 + \frac{4}{\beta} \right) \sqrt{f'_c} b_0 d \\ \left(\frac{\alpha_s d}{b_0} 2 \right) \sqrt{f'_c} b_0 d, \\ 4 \sqrt{f'_c} b_0 d \end{cases} \quad (10)$$

где V_u – продавливающая сила;

f'_c – прочность бетона сжатию;

α_s – коэффициент, зависящий от расположения фундамента (крайнего ряда, среднего ряда или угловой).

Первое из условий учитывает влияние коэффициента β , выражающего соотношение сторон площадки продавливания, второе – влияние отношения рабочей высоты сечения d к периметру контура расчетного поперечного сечения b_0 , третье условие устанавливает предельное значение продавливающей силы. При этом считается, что расчетное поперечное сечение расположено вокруг зоны передачи усилий на расстоянии не менее половины рабочей высоты сечения от границы указанной зоны.

Анализируя существующие теории и методики расчета отдельно стоящих фундаментов при хрупком разрушении, можно сделать вывод, что они основываются на зависимостях различных факторов: в расчетных формулах учитываются различные эмпирические коэффициенты, различные прочностные характеристики материалов, различные формы тел продавливания. Поэтому для изучения характера разрушения плитных фундаментов и разработки теории расчета, наиболее точно соответствующей фактической работе фундаментов под нагрузкой, необходимо проведение экспериментальных исследований.

С целью экспериментального обоснования положений рассматриваемого метода нами были проведены многочисленные опыты по получению продавливания фундаментных плит, испытано 49 крупномасштабных образцов фундаментных плит размерами $1,0 \times 1,0 \times 0,1$ м и 29 плит 2×2 м высотой сечения от 0,08 м до 0,4 м. В рассмотрение были включены четыре фактора, существенно влияющие на хрупкую прочность плит: вылет консоли (расстояние от грани плиты до грани монолитной вышележащей ступени), высота плиты, коэффициент армирования подошвы плиты и класс бетона по прочности на сжатие. Каждый из факторов имел пять параметров [12,17], охватывающих все встречающиеся в практике случаи и гарантирующих потерю прочности плит по одному из видов хрупкого разрушения (таблица 1).

Опыты проводили в железобетонном лотке размером $4 \times 4 \times 3$ (h) м (рис.1), заполненном песком $M_k = 1,4$, высота слоя составляла 2,2-2,4 м, перед очередным испытанием песок раскапывали и послойно уплотняли до достижения объемной массы $1,65-1,7$ т/м³.

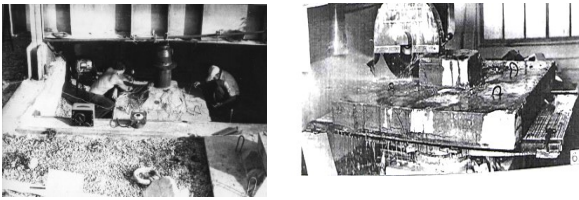


Рис. 1. Оборудование для проведения экспериментальных исследований

Fig. 1. Equipment for conducting experimental research

Нагрузку передавали центрально с установленной выдержкой на каждой ступени одним или двумя гидродомкратами 1000 кН и 2000 кН. В процессе возрастания уровня внешнего усилия, вплоть до разрушения фундамента, изучали деформации бетона, стержней арматурной сетки, трещинообразование, деформации поверхности плитной части, общую осадку конструкции и контактные напряжения в грунтовом основании.

Деформации бетона сжатой зоны и стержней арматурной сетки замеряли тензорезисторами с базой 20 и 50 мм с регистрацией показаний на цифровом измерителе деформаций ИДЦ-1. Прогобы поля плиты – индикаторами часового типа с диапазоном измерений от 0-10 мм. Осадку плит – прогибомерами марки 6ПАО с диапазоном измерений от 0-100 мм; контактные напряжения электротензометрическими месдозами. Фиксацию начала трещинообразования проводили методом акустической эмиссии, используя серийные пьезопреобразователи 150 кГц или высокочувствительные микрофоны [17]. Контроль ширины раскрытия трещин по краям плиты проводили с использованием микроскопа МПБ-3 с диапазоном измерений от 0-0,7 мм, контроль развития трещин на подошве плиты и ширину их раскрытия проводили специально разработанными датчиками [1]. После испытаний часть образцов фундаментных плит, для изучения траектории внутреннего трещинообразования, в сечении по грани нагрузочной ступени, распиливали на камнерезном станке дисковыми пилами с алмазными резаками (рис.1).

В отличие от приведенных другими исследователями испытаний [9,10,11,15] нами было сосредоточено внимание на области плиты, примыкающей к нагрузочной ступени в зоне хрупкого разрушения. В этой зоне характерны следующие особенности напряженно-деформированного состояния (НДС), рисунок 2: действие местных напряжений от колонны (нагрузочной ступени) σ_y и σ_z ; концентрация изгибающих моментов M_y , увеличивающаяся при уменьшении площади опирания нагрузочной ступени и приводящая к дополнительным напряжениям в арматуре σ_s ; концентрация поперечных сил Q , как следствие перераспределения контактных давлений (рис.2), приводящая к концентрации касательных напряжений τ_{yz} ;

При ограничении горизонтальных перемещений опорных зон плит – действие дополнительного

распора, влияющего на наклон изостат; при действии сосредоточенных усилий на контакте (плиты при испытании на пруженных стендах) – влияние этих усилий на наклон изостат, а также на распределение деформаций и напряжений.

Известно, что трещины в хрупких телах делятся на трещины нормального отрыва и сдвига [6] и в непереармированных железобетонных конструкциях распространяются с некоторым приближением в направлении изостат [14], то есть являются трещинами отрыва. На рисунке 3 показаны схемы образования наклонных трещин.

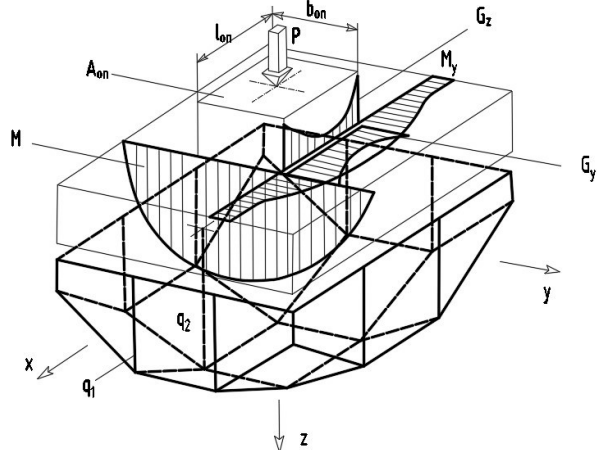


Рис.2. Эпюры, характеризующие напряженно-деформированное состояние фундамента

Fig. 2. Diagrams characterizing the stress-strain state of the foundation

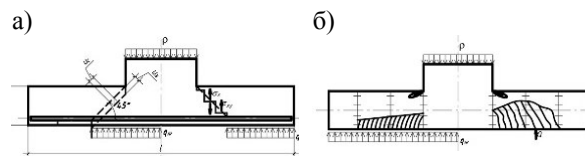


Рис.3. Схемы образования наклонных трещин и траектории главных напряжений (изостаты) а-пирамида продавливания по СП [13] (слева) и действие усилий в сечении под углом 45° (справа); б-сравнительные схемы образования и направления трещин при распределенной по основанию нагрузке (контактные давления от грунта, слева) и от сосредоточенной силы (например, при испытаниях на пружинных стендах, справа)

Fig. 3. Schemes of inclined crack formation and trajectories of principal stresses (isostats)

При одновременном отрыве всей поверхности пирамиды (рис.3,а) должен происходить отрыв v_o и сдвиг v_c в трещине, что невозможно, исходя из описанных выше положений. И действительно, отрыву пирамиды в опытах предшествует раскрытие трещин в растянутой зоне [9,10,14,15].

На рисунке 4 обобщены применяемые методы расчета на продавливание выдвинутые зарубежными и отечественными учеными: а-предложение М.Герцог [20]; б-предложение Рохлина И.А., Попова О.С. [11]; в-предложение Ю.Н.Мурзенко, А.А.Цесарского [10,15]; справа показаны экспериментально полученные схемы

трещинообразования, предшествующие продавливанию.

Изучение траекторий распространения внутренних трещин [14] показывает, что во всех описанных в литературе случаях «продавливания», в том числе и с «перевернутой» пирамидой, трещины распространяются с некоторым приближением в направлении изостат (за исключением некоторых опытов, в которых был получен срез сжатой зоны. При больших перемещения колонны (опорной нагрузочной ступени) играют роль касательные усилия на контакте арматуры и бетона, отклоняющие изостаты и трещины вблизи арматуры вдоль рабочей арматуры.

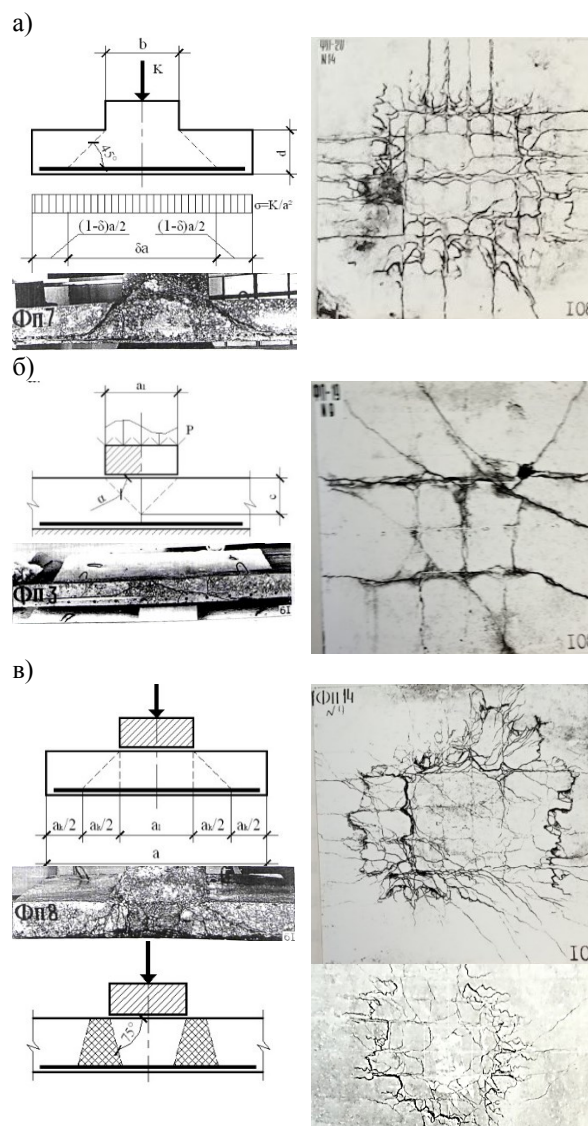


Рис.4. Схемы трещинообразования
Fig. 4. Cracking patterns

Данные различных опытов по получению продавливания [8-11,14,15] не противоречат друг другу. Угол наклона трещин и развитие обратной «пирамиды» зависят от описанных выше особенностей НДС в каждом отдельном случае. Преобладание (по величине) напряжений от изгиба или от местного сжатия, нормальных сил или

касательных, в различной степени влияет на наклон и распределение изостат.

Случаи образования обратной «пирамиды» (рис. 4 в) объясняется действием касательных напряжений на контакте штампа и плиты аналогично испытанию кубика на сжатие (рисунок 4 б) и концентрацией усилий в стальной опорной плите при изгибе фундаментной плиты и таким образом, действием на фундаментную плиту раздельных сосредоточенных на малой площадке усилий (рисунок 4 в). В обоих случаях трещины не отклоняются значительно от изостат.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Построение областей трещинообразования и изостат для некоторых случаев хрупкого разрушения подтверждает сделанный ранее анализ (рис. 3,5). Полученные нами схемы внутренних трещин соответствует сделанному анализу. На рисунке 5 приведены схемы разрушения фундаментов: а, б – при дроблении сжатой зоны; в – при дроблении и срезе сжатой зоны; г – при смятии бетона.

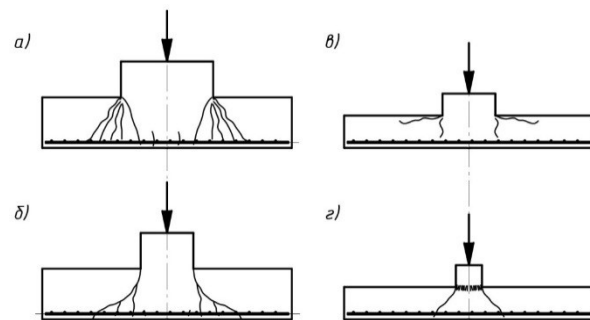


Рис.5. Схемы трещинообразования,
предшествующие продавливанию железобетонных плит
Fig. 5. Crack formation patterns preceding the penetration of
reinforced concrete slabs

«Пирамиды» продавливания были получены после дробления сжатой зоны, ее среза и смятия под колонной (рис. 5). Во всех случаях имело место хрупкое перемещение колонны относительно плиты (при срезе – мгновенное, при дроблении и смятии – постепенное). Нагрузки, соответствующие разрушению, превышали нагрузки продавливания по СП [13] в 1,3-3,1 раза (чаще в 1,6-2,0 раза). Степень превышения зависела от параметров плит (табл.1).

Приведенный анализ позволяет объяснить «продавливание» в [5,7] при уменьшении размера колонны. При этом резко возрастает концентрация изгибающих моментов, а следовательно, и сжимающих напряжений у колонны, что наряду с местными напряжениями вызывает подкол сжатой зоны наклонной трещиной.

Таким образом, действительным механизмом хрупкого разрушения плит можно считать дробление, срез сжатой зоны и смятие бетона под опорой, с последующими (вторичными) образованиями «пирамиды» продавливания. В случае дробления сжатой зоны наилучшие

результаты дает расчет критического сочетания главных напряжений в приопорной части плиты [12,14,17].

Чем больше процент армирования, тем большее влияние арматуры на отклонение изостат вблизи нее. Этим и объясняется различие в направлении трещин в разных опытах (вплоть до откола всей сетки горизонтальной трещиной) (рис.6).

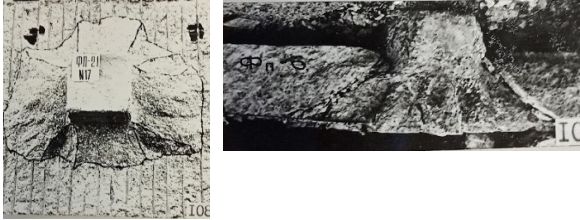


Рис.6. Схема трещинообразования при больших процентах армирования
Fig. 6. Crack formation pattern at high reinforcement percentages

В виду того, что напряжения σ_y и σ_z концентрируются в углах площадки, передающей внешнюю нагрузку на плиту, очевидно, что это место в плитах в первую очередь подвержено хрупкому разрушению. Расчет хрупкой прочности рекомендуется выполнять для угловых зон стыка нагрузочной площади (колонны) и плиты в сжатой зоне бетона с учетом концентрации M_y , Q , σ_y , σ_z и τ_{zy} – начало трещинообразования считается хрупким разрушением. Нами выполнены расчеты с целью проверки соблюдения условия (16) по образованию наклонных трещин для этих зон плит и даны конструктивные предложения по снижению концентрации напряжений в этих зонах (рис. 7).

При этом сначала вычисляют:

$$\sigma_z = n \cdot \frac{P}{A_{on}}, \quad (11)$$

где n - коэффициент, учитывающий неравномерность распределения σ_z и σ_y по грани опоры: $n = 1,3 \dots 1,5$.

Затем определяют:

$$\sigma_y = \frac{n \cdot \sigma_s \cdot A_s}{2 \cdot b_{on} \cdot \left(h_0 - \frac{M}{\sigma_s \cdot A_s} \right)}, \quad (12)$$

где b_{on} - ширина опоры;

$$M = 0,167 \cdot [0,5 \cdot (l - b_{on}) - f \cdot (0,9 \cdot h_0 + a)]^2 \times \left\{ \frac{3 \cdot P}{l} - \frac{\lambda_s \cdot [0,5 \cdot (l - b_{on}) - f \cdot (0,9 \cdot h_0 + a)] \cdot l \cdot P}{0,9 \cdot h_0 \cdot A_{\phi} \cdot s} \right\} \quad (13)$$

причем λ_s - удлинение в арматуре в зоне образования пластического шарнира:

$$\lambda_s = 0,05 \text{ см} \quad [14];$$

f - коэффициент трения между подошвой плиты и грунтом основания [17];

A_{ϕ} - площадь подошвы фундамента;

s - осадка фундамента.

Далее находят τ_{zy} , принимая с некоторым допущением их распределение над трещиной равномерным:

$$\tau_{zy} = \frac{Q \cdot \sigma_y}{n \cdot \sigma_s \cdot A_s}, \quad (14)$$

Для установления Q находят объемные эпюры контактных давлений в зоне опорной площадки (рис. 1):

$$Q = \frac{0,5 \cdot q_1 \cdot b_{on} \cdot (l - b_{on})}{l} + 0,25 \cdot \left(\frac{q_2}{l} - \frac{q_1}{l} \right)^2 \cdot b_{on} \cdot (l - b_{on}), \quad (15)$$

После этого определяют величину главных растягивающих и главных сжимающих напряжений в бетоне сжатой зоны:

$$\sigma_{mt} = \frac{\sigma_z + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{zy}^2}$$

И проверяют условие: при главных сжимающих напряжениях $\sigma_{mc} > 0,5 \cdot R_{b,ser}$:

$$\sigma_{mt} \leq 2 \cdot R_{bt,ser} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{mc}}{R_{b,ser}} \right), \quad (16)$$

Принятые коэффициенты условий работы 0,5 и 2,0 для главных сжимающих σ_{mc} и главных растягивающих σ_{mt} напряжений приняты для классов бетона по прочности на сжатие не выше В30, что соответствует применяемому классу бетона для фундаментных плит.

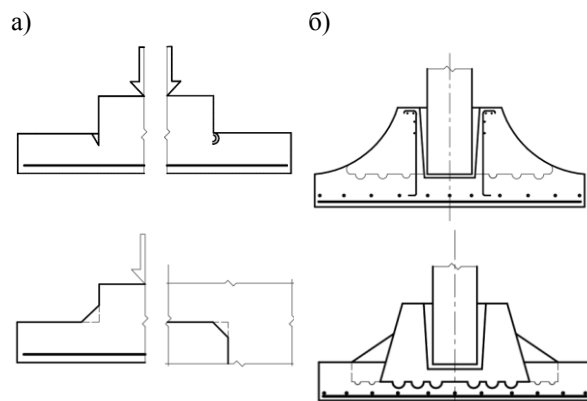


Рис.7. Конструктивные решения по снижению концентрации напряжений в сжатых зонах плитных фундаментов:

а-устройство деформируемых вставок [3]; б-выполнение сжатых зон из более прочных бетонов и многогранной конфигурации [2,4]; в-устройство вутов

Fig. 7. Design solutions for reducing stress concentration in compressed areas of slab foundations

Расчет плит по предлагаемой методике показал, что при нагрузках, близких к разрушающим, в сжатой зоне образуются трещины – условие (16) по образованию трещин не соблюдается.

Расчет с учетом перераспределения эпюры контактных давлений, действия касательных напряжений по контакту фундаментной плиты и

грунтового основания, распределения σ_y , σ_z и момента M_y в сжатой зоне бетона ранее испытанных плит (табл.1 строки 1, 4 и 5) показал, что при нагрузках, близких к разрушающим, в сжатой зоне образуются трещины. Начало образования трещин

происходит в зонах концентрации σ_y , σ_z и M_y в углах опорной площади. При росте нагрузки происходит трещинообразование в остальных участках контура.

Таблица 1. Характеристика образцов фундаментов и результаты испытаний
Table 1. Characteristics of foundation samples and test results

№ п/п	Параметры образцов							Нагрузки (в кН), соответствующие:					$\frac{P}{F}$
	Размер в плане, м	Опорная площадка, см	h, см	$\frac{h}{l-b_{on}}$	Прочность бетона, МПа	As, см ²	Класс арматуры	гродавли- ванию	Раздроб- лению бетона сжатой зоны	среза бетона сжатой зоны	смя- тию бетона	опытные значения P	
1	2x2	30x30	32	0,38	38,7	58,5	A400	1590	3540	6900	3540	2450	1,54
2	-/-	40x40	8	0,1	31,7	7,9	A240	202	74	819	5200	445	2,2
3	-/-	30x30	16	0,19	20,7	15,4	A400	315	433	1122	1931	882	2,8
4	-/-	40x40	24	0,3	20,7	43,3	A400	775	1988	2764	3433	1050	1,36
5	-/-	40x40	32	0,4	12,3	14,7	A400	925	1627	2803	2060	1340	1,45
6	-/-	50x50	32	0,43	20,0	54,3	A400	1583	2746	5540	5175	3750	2,37
7	-/-	60x60	24	0,34	32,1	40,0	A400	1546	1869	6321	11832	2690	1,74
8	-/-	70x70	24	0,37	31,7	26,0	A400	1859	1483	7564	15893	4050	2,18
9	-/-	30x30	8	0,09	51,2	10,2	A400	204	139	1025	4770	344	1,69
10	-/-	50x50	16	0,21	25,8	33,1	A400	520	1105	1859	5391	1076	2,07
11	-/-	60x60	16	0,23	42,4	5,0	A400	997	235	4526	15552	1384	1,39
12	-/-	60x60	24	0,34	29,8	33,1	A400	1474	2166	5850	10950	2460	1,67
13	1x1	25x25	10	0,27	15,5	7,0	A240	134	181	426	990	300	2,24
14	-/-	25x25	10	0,27	14,0	7,0	A240	125	196	387	900	209	1,67
15	-/-	40x40	10	0,33	17,6	7,5	A240	252	315	323	2793	750	2,98
16	-/-	40x40	10	0,33	20,0	7,5	A240	188	244	265	131	336	3,1

ВЫВОДЫ

1. Приведено объяснение вторичного характера образования пирамиды продавливания как следствие истинного хрупкого разрушения плитных конструкций при передаче нагрузки по ограниченной площади – дробления, среза или смятия бетона с учетом местных напряжений и концентрации изгибающих моментов, а для фундаментов и поперечных сил позволяет с достаточной обоснованностью свести все разнообразие формы хрупкого разрушения с образованием различных «пирамид» к трем – дроблению, срезу и смятию бетона.

2. Так как смятие бетона обычно исключается при относительно больших площадях колонн, а срез сжатой зоны наблюдается для фундаментов из низкопрочных бетонов, то основной формой хрупкого разрушения при действии ограниченной по площади нагрузки на плиту является дробление сжатой зоны.

3. Анализ проведенных нами опытов с большой выборкой крупномасштабных моделей фундаментов показывает, что формула 8.87 [13], часто не позволяет получить значения хрупкой прочности (прочности на продавливание), опытные величины могут значительно превышать расчетные, причем превышение непостоянно. Для фундаментных плит минимально наблюдавшийся коэффициент перед правой частью формулы равен 1,3.

4. Наиболее точные результаты представляя расчет критического сочетания главных напряжений в приопорной части (в углах стыка с колонной), в случае двух или трехосного напряженного состояния и дает возможность

получать более близкие к фактическим расчетные значения разрушающих нагрузок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. СССР № 697804 : Датчик для измерения размеров раскрытия трещин в деталях / Тетиор А.Н., Борисов М.И., Родин С.В. — 1979. — Оpubл. 15.11.1979, Бюл. № 42.
2. А. с. 857360 СССР, М.Кл.3 Е 02 D 27/42 . Фундамент под колонну / С.В. Родин, А.Н. Тетиор, В.И. Редькин (СССР). - № 2849580/29-33; заявл. 10.12.79; опубл. 23.08.81, Бюл. №31.
3. А.с. СССР № № 846686 : Объемный строительный элемент/ Тетиор А.Н., Жуков С.П., Родин С.В. — 1981. — Оpubл. 15.07.1981, Бюл. № 26.
4. Пат. № 20119 Україна, Фундамент під колону/ Родін Д. С.— МПК E02D 27/00 (2006)/ заявник Національна академія природоохоронного та курортного будівництва. — № 200607274 ; заявл. 30.06.2006 ; опубл. 15.01.2007, Бюл. № 1.
5. Гвоздев А.А., Залесов А.С., Ермуханов К.Е. Переходные формы между разрушением по наклонному сечению и продавливанием // Бетон и железобетон, 1980. № 3.— С. 27-28.
6. Зайцев Ю.В. Развитие трещин в хрупком материале при кратковременном сжатии. — Известия вузов. Строительство и архитектура, 1974. — С.25-30.
7. Залесов А.С., Ермуханов К.Е. Переход от разрушения по наклонному сечению к продавливанию. — В сб.: Поведение бетона и элементов железобетонных конструкций при

воздействию различной длительности. – М.: НИИЖБ, 1980. – С. 66-84.

8. Залесов А.С., Тетиор А.Н., Родин С.В., Лехно А.М. Прочность плитных фундаментов по наклонным сечениям // Бетон и железобетон. -1987. - №10. – с. 45-46.

9. Коровин Н.Н. Ступкин А.В. Продавливание железобетонных плит колонной // Бетон и железобетон. - 1978. - №8. - С. 36-38.

10. Мурзенко Ю.Н., Евтушенко С.И., Анищенко Е.Ю. Результаты экспериментальных исследований совместной работы моделей железобетонных фундаментов под колонны зданий и песчаного основания // Сб. IV Междунар. науч.-практ. конф.: Моделирование. Теория, методы и средства. - Новочеркасск: ЮРГТУ, 2004. - ч. 4. - С. 43-49.

11. Рохлин И.А., Попова О.С. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния железобетонных плит при продавливании: Материалы к третьей Всесоюзной конф. – Новосибирск – Киев, 1973. – С. 59-60.

12. Силовое взаимодействие фундаментов мелкого заложения с грунтовым основанием: монография / С.В. Родин, Э.М. Меннанов, Ю.Г. Богущий; Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского. – Симферополь: Ариал, 2024. – 258 с.

13. СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции». Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003». [Текст]. – М.: Минстрой России, 2018. – 143 с.

14. Тетиор А.Н., Родин С.В. О механизме хрупкого разрушения столбчатых фундаментов. – Бетон и железобетон, 1982. № 9. – С. 43-44.

15. Цесарский А.А. К расчету прочности железобетонных фундаментных плит на продавливание. – В сб.: Исследование напряженно-деформированного состояния оснований и фундаментов. – Новочеркасск: Новочеркасский ПИ, 1971. – С. 41-44.

16. Экспериментальные и теоретические исследования работы плитных фундаментов: монография / С.И. Политов, С.И. Евтушенко, Д.А. Калафатов; Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского. - Новочеркасск: Лик, 2024. - 198 с.

17. Экспериментальные исследования работы столбчатых фундаментов на моделях: монография / С.В. Родин, С.И. Евтушенко, Д.А. Калафатов; Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского. – Новочеркасск: Лик, 2024. – 183 с.

18. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary: ACI 318-05. U.S.A. - 2005. - 1445 p.

19. Design of Concrete Structures: Eurocode 2: EN 1992-1. - Brussel. - 2001. - 230 p.

20. Herzog M. Einfluss der Spanngliedordnung auf den Durch Stnzwiderstand vorgespannter Flachdecken nach Versuchen // Beton und Stahlbetonbau. – 1979. – 2. – p. 294-296.

REFERENCES

1. A. s. USSR Patent No. 697804: Sensor for Measuring the Opening of Cracks in Parts / Tetior A.N., Borisov M.I., Rodin S.V. — 1979. — Published on November 15, 1979, Bulletin No. 42.

2. A. s. 857360 USSR, M.Kl.3 E 02 D 27/42 . Foundation for a Column / S.V. Rodin, A.N. Tetior, V.I. Redkin (USSR). - No. 2849580/29-33; applied for 10.12.79; published on 23.08.81, Bulletin No. 31.

3. A. s. Patent No. 846686: Volumetric Building Element/ Tetior A.N., Zhukov S.P., Rodin S.V. — 1981. — Published on July 15, 1981, Bulletin No. 26.

4. Pat. No. 20119 Ukraine, Foundation for a column/ Rodin D. S.– IPC E02D 27/00 (2006)/ applicant National Academy of environmental and resort construction. - No. 200607274; declared. 30.06.2006; publ. 15.01.2007, Byul. № 1.

5. Gvozdev A.A., Zalesov A.S., and Yermukhanov K.E. Transitional Forms between Slanting Section Failure and Punching // Concrete and Reinforced Concrete, 1980. No. 3. pp. 27-28

6. Zaitsev Yu.V. Development of cracks in brittle material under short-term compression. – Izvestiya vuzov. Construction and architecture, 1974. – Pp.25-30.

7. Zalesov A.S., Yermukhanov K.E. Transition from destruction along an inclined section to punching. – In the collection: Behavior of concrete and elements of reinforced concrete structures under the influence of different durations. – М.: NIIZhB, 1980. – Pp. 66-84.

8. Zalesov A.S., Tetior A.N., Rodin S.V., Lekhno A.M. Strength of slab foundations along inclined sections // Concrete and reinforced concrete. - 1987. - No. 10. - pp. 45-46.

9. Korovin N.N. and Stupkin A.V. Pushing of Reinforced Concrete Slabs by a Column // Concrete and Reinforced Concrete. - 1978. - No. 8. - Pp. 36-38.

10. Murzenko Yu.N., Yevtushenko S.I., Anishchenko E.Yu. Results of experimental studies of the joint operation of models of reinforced concrete foundations for building columns and a sandy base // Sat. IV Int. scientific-practical conf.: Modeling. Theory, methods and means. - Novocherkassk: YURGTU, 2004. - Part 4. - P. 43-49.

11. Rokhlin I.A., Popova O.S. Experimental Study of the Stress-Strain State of Reinforced Concrete Slabs during Pushing: Materials for the Third All-Union Conference. Novosibirsk-Kiev, 1973, pp. 59-60.

12. Force Interaction of Shallow Foundations with Soil Base: Monograph / S.V. Rodin, E.M. Mennanov, Yu.G. Bogutsky; V.I. Vernadsky Crimean Federal University. – Simferopol: Arial, 2024. – 258 p.

13. SP 63.13330.2018 "Concrete and reinforced concrete structures". Basic provisions. Updated version of SNiP 52-01-2003". [Text]. – Moscow: Ministry of Construction of the Russian Federation, 2018. – 143 p.

14. Tetior A.N., Rodin S.V. On the mechanism of brittle failure of pile foundations. – Concrete and reinforced concrete, 1982. No. 9. – Pp. 43-44.

15. Tsesarsky, A.A. Calculation of the Strength of Reinforced Concrete Foundation Slabs for Pushing Through. In the collection: Research of the Stressed and

Deformed State of Bases and Foundations. Novocherkassk: Novocherkassk Polytechnic Institute, 1971, pp. 41-44.

Vernadsky Crimean Federal University. - Novocherkassk: Lik, 2024.-198 p.

17. Experimental studies of the performance of pile foundations on models: monograph / S.V. Rodin, S.I. Yevtushenko, D.A. Kalafatov; V.I. Vernadsky Crimean Federal University. – Novocherkassk: Lik, 2024. – 183 p.

18. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary: ACI 318-05. U.S.A. - 2005. - 1445 p.

16. Experimental and theoretical studies of the operation of slab foundations: monograph / S.I. Politov, S.I. Yevtushenko, D.A. Kalafatov; V.I.

19. Design of Concrete Structures: Eurocode 2: EN 1992-1. - Brussel. - 2001. - 230 p.

20. Herzog M. Einfluss der Spanngliedordnung auf den Durch Stnzwiderstand vorgespannter Flachdecken nach Versuchen // Beton und Stahlbetonbau. – 1979. – 2. – p. 294-296.

PUNCHING OF REINFORCED CONCRETE FOUNDATION SLABS

Rodin¹ S.V., Mennanov² E.M., Bogutsky³ Y.G., Kalafatov D.A.⁴

V.I. Vernadsky Crimean Federal University,

Institute "Academy of Construction and Architecture"

181, Kievskaya str., Simferopol, Republic of Crimea, 295493

E-mail: ¹sv_rodin@mail.ru, ²mennanov.elmar@mail.ru, ³bogutskiyyg@mail.ru, ⁴jafer90@mail.ru

Abstract. The article provides an explanation of the secondary nature of the formation of a crushing pyramid as a consequence of the true brittle failure of slab reinforced concrete structures – crushing, shearing, or crushing of concrete, taking into account local stresses and the concentration of bending moments, and for foundations, the additional redistribution of contact stresses in the soil foundation and lateral forces, which allows us to reasonably reduce the variety of types of brittle failure with the formation of various forms of crushing pyramids to three: crushing, shearing, and crushing of concrete. Experimental studies were conducted with large-scale reinforced concrete foundation models on a sandy base, which allowed for the study of the parameters of the foundation and soil interaction and the determination of geometric and strength factors (console span, foundation slab height, reinforcement, and concrete strength) that play an important role in the formation of the foundation's brittle failure process, such as punching.

Subject of research: stress-strain state of foundations during brittle failure in the form of crushing.

Materials and methods: Experimental studies were conducted to obtain the penetration of foundation slabs, and 49 large-scale samples of foundation slabs measuring 1x1x0.1 m and 29 slabs measuring 2x2 m with a cross-section height ranging from 0.08 m to 0.4 m were tested. The tests were conducted in a 4x4x3(h) m reinforced concrete tray, with a sand layer of 2.2-2.4 m. The power equipment allowed for loading the foundation slabs with a force of up to 4000 kN, and the recording equipment, including specialized equipment for foundation research, provided high-precision measurements of the parameters of the soil-foundation system.

Results: The methods of calculating the plates for the crushing and directions of improving the calculations of brittle strength are analyzed. The influence of the basic parameters of the foundations structures on the sandy soil base on the brittle strength during crushing is experimentally studied. The formation of different forms of the crushing pyramid as a secondary process of destruction from crushing, shearing or crushing of concrete is substantiated, constructive solutions are proposed to reduce the influence of the concentration of stresses and forces in the area of loading near the support.

Conclusions: The calculation of foundations for продавливание according to formula 8.87 of SP 63.13330.2018 "Concrete and Reinforced Concrete Structures" often does not allow for sufficient accuracy in obtaining values of brittle strength (продавливающей strength), and the experimental values may significantly exceed the calculated values, with the excess being inconsistent. For foundation slabs, the minimum observed coefficient before the right-hand side of the formula is equal to 1.3. The actual mechanism of brittle failure of slabs can be considered to be crushing, shear of the compressed zone and crushing of concrete under the support, with subsequent (secondary) formations of the pyramid of the push-through. In the case of crushing of the compressed zone, the best results are given by the calculation of the critical combination of the principal stresses in the near-support part of the slab.

Key words: punching, reinforced concrete, foundation, redistribution, base, soil, research, cutting, crushing, crumpling.