

Прочность бетона при смятии

Б.С.Соколов, А.Б.Антаков

Термин «смятие» употребляется в научной и нормативной литературе при оценке прочности стыков элементов и конструкций в случае местного (локального) приложения сжимающих нагрузок и подразумевает особенность характера разрушения бетона – его раздробление, раздавливание структуры материала с выделением крупного заполнителя, частей цементного камня и пыли. В последнее время такой вид разрушения классифицируется как компрессионное раздавливание. Он вызван работой бетона в условиях трехосного сжатия, когда сопротивление разрушению возрастает в несколько раз по сравнению с прочностью на осевое сжатие. Учитывая повышенную ответственность стыков за обеспечение конструкционной безопасности не только отдельных элементов, но и зданий в целом, изучению их работы посвящено большое количество исследований отечественных и зарубежных ученых, результаты которых отражены в нормах. Сопротивление сжатию оценивается прочностью материала на сжатие с увеличением на коэффициент, учитывающий соотношение грузовой и «расчетной» площадей. Величина последней принимается в зависимости от места расположения нагрузки. Такой подход не отражает действительной работы материала. Ниже показана попытка объяснить процесс разрушения на основе теории силового сопротивления анизотропных материалов при сжатии [1].

В сжимающем силовом потоке, передающемся на конструкции от местного действия нагрузки, образуются две области напряженного состояния – область «сжатия-сжатия» непосредственно под грузовой площадкой и «сжатия-растяжения» на некотором расстоянии от нее. Высота этих областей зависит в основном от соотношения размеров грузовой площадки к размерам конструкции. При этом в области «сжатия-сжатия» формируются уплотнения в виде клиньев, повторяющих в основании форму грузовой площадки (пирамид, конусов и др.), что влияет на характер распределения напряжений в области «сжатия-растяжения». Разрушение бетона может происходить в обеих областях. Однако, поскольку прочность материала в области «сжатия-растяжения»

ниже, чем в области «сжатия-сжатия», разрушение в большинстве случаев начинается с области «сжатия-растяжения». На основании перечисленного была разработана физическая модель, описывающая процесс разрушения бетона в области «сжатия-растяжения» сопротивлением отрыву, сдвигу и раздавливанию (рис. 1). Определены ее геометрические, физические и статические характеристики. Это позволило представить условие прочности в виде [2]:

$$N \leq N_{ult} = \frac{N_{bt} \cos \alpha + N_{sh} + N_{ef}}{\sin \alpha}, \quad (1)$$

где N – усилие от внешней нагрузки;

N_{bt} , N_{sh} , N_{ef} – соответственно сопротивление бетона отрыву, сдвигу и раздавливанию.

Геометрические параметры определяются в зависимости от размеров элемента, грузовой площадки и угла наклона граней клина α , являющегося специфической характеристикой бетона, зависящей от его вида и соотношения сопротивлений сжатию и растяжению:

$$A_{bt} = 2a(h - l_{loc} \sin \alpha \cos \alpha), \quad (2)$$

$$A_{sq} = 2(1 + \sin^2 \alpha) l_{loc}^2, \quad (3)$$

$$A_{ef} = l_{loc}^2 \sin^4 \alpha, \quad (4)$$

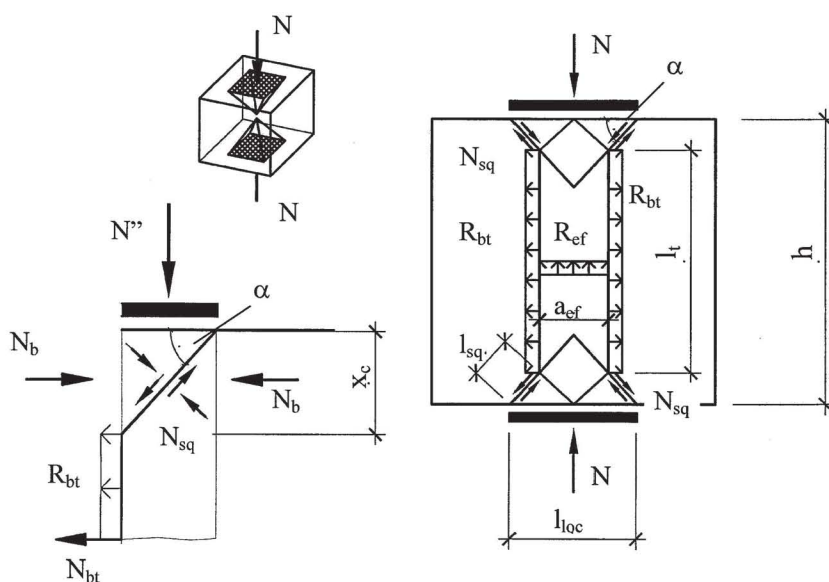


Рис. 1. Построения физической модели разрушения бетона в сжимающем силовом потоке

где α , h , l_{loc} – длина (ширина), высота элемента и размер грузовой площадки. При сплошном загрузении $l_{loc} = \alpha$; $\alpha = \arctg(0,25 \frac{R_b}{R_{bt}} - 1,56)$ – угол наклона граней клина.

Сопротивление бетона растяжению R_{bt} определяется в зависимости от нормативного соотношения величин $\frac{R_{bt}}{R_b}$, соответствующего прочности бетона на сжатие в интервале $(0,08 \div 0,14)R_b$. Сопротивление бетона сдвигу $R_{sq} = 2,5R_{bt}$.

По условию (1) проведено сравнение разрушающих усилий образцов в многочисленных опытах [2]. Получено удовлетворительное их совпадение, что свидетельствует о возможности применения предлагаемого подхода для практического использования.

Для разработки методики расчета объемных элементов при действии местных нагрузок проведены комплексные исследования, включающие многофакторное компьютерное моделирование элементов и физические эксперименты [3]. Программы исследований приведены на рис. 2.

На рис. 3 показаны образцы после испытаний, по которым нетрудно увидеть две характерные схемы разрушения: по сжато-растянутой области (рис. 4, а) и по области «сжатия-сжатия» (рис. 4, б) сжимающего силового потока [3].

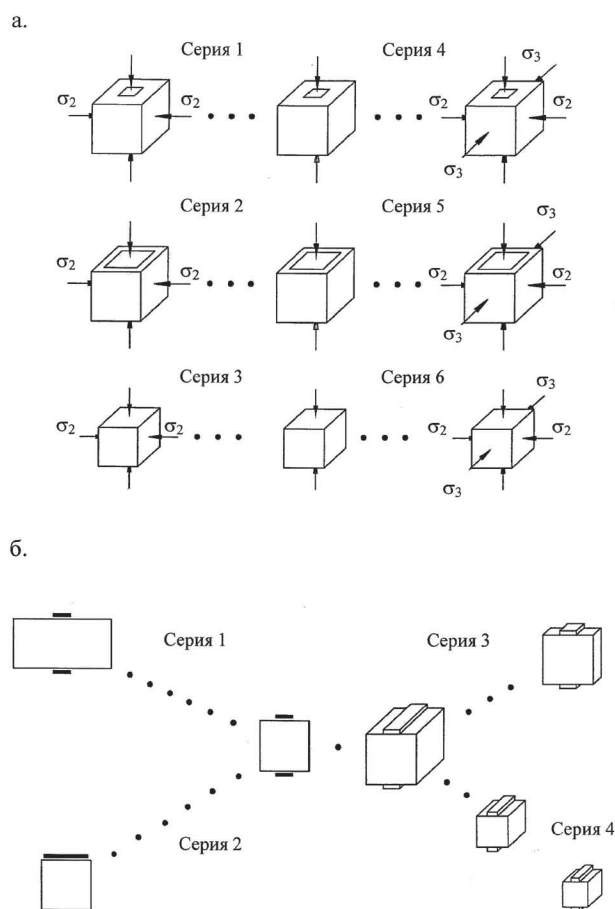


Рис. 2. Программы численных и экспериментальных исследований

Первый из описанных видов разрушения полностью соответствует положениям физической модели [1, 2] и описывается условием прочности (1).

Для описания второго вида разрушения применена многоклинчатая модификация модели, описывающая механизм компрессионного раздавливания материала под грузовыми площадками (рис. 4). Этот процесс характеризуется высокой степенью деформативности в направлении действия напряжений σ_1 – значения ϵ намного превышают величины ϵ_{ult} , полученные для одноосного напряженного состояния. Описанная особенность становится возможной при действии на рассматриваемый объем материала под штампом обжимающих усилий, создающих «обойменный» эффект, препятствующих поперечным деформациям. Гипотеза о формировании вторичных клиньев под грузовой площадкой с размером l_{loc} предполагает наличие зависимости $n=f(\sigma_0+\sigma_{2(3)})$, где n – количество вторичных клиньев, образующихся в плоскости действия указанных напряжений.

Выражение для определения количества «вторичных» клиньев n^2 для случая с квадратным штампом выглядит следующим образом:

$$n = 1 + \frac{(\sigma_0 + \sigma_{2(3)})}{R_b}, \quad (5)$$

где $\sigma_0 = \frac{N_b}{x_c}$ – напряжения поперечного обжатия области под грузовой площадкой;

$$N_b = N_{bt} = R_{bt} A_{bt} \quad [2],$$

$\sigma_{2(3)}$ – внешние напряжения поперечного обжатия;

$x_c = 0,5 l_{loc} \tg \alpha$ – высота трехосно сжатой зоны.

Входящие в условие (1) внутренние усилия, возникающие в рассматриваемой трехосно сжатой области под штампом, вычисляются по выражениям:

$$N_{bt} = 2anR_{bt}^* \left(x_c - \frac{l_{loc}}{n} \sin \alpha \cos \alpha \right), \quad (6)$$

$$N_{sq} = 2R_{sq}^* (1 + \sin^2 \alpha) l_{loc}^2, \quad (7)$$

$$N_{ef} = R_b l_{loc}^2 \sin^4 \alpha, \quad (8)$$

где, учитывая особенности характера разрушения бетона при местном действии нагрузки и различную природу напряжений σ_q , зависящих от уровня растягивающих усилий N ,

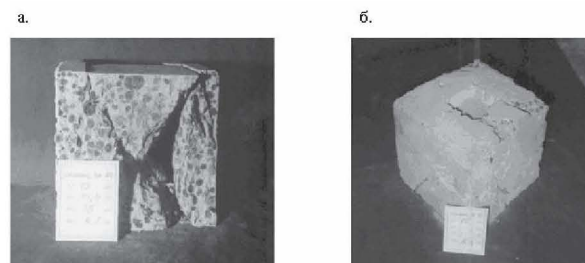


Рис. 3. Виды разрушения бетона – от отрыва со сдвигом клиньев (а) и компрессионного раздавливания материала непосредственно под штампом (б)

в средней зоне элемента, и $\sigma_{2(3)}$, являющихся внешними воздействиями, не связанными с напряженным состоянием бетона, при выполнении расчетов следует выполнять ряд условий:

– в зависимости от величины соотношения $\frac{A_{loc}}{A}$ при $\sigma_{2(3)} = 0$. Если $\frac{A_{loc}}{A} \leq 0,35$ – значения σ_0 учитываются при вычислении приведенного сопротивления бетона сдвигу:

$$R_{sq}^* = R_{sq} + \sigma_0 \cos \alpha \quad (9)$$

Если $\frac{A_{loc}}{A} > 0,35$ – напряжения σ_0 не учитываются;

– в зависимости от уровня напряжений $\sigma_{2(3)}$. Если $\frac{\sigma_{2(3)}}{R_b} < 0,1$, разрушение элемента происходит от раскалывания, и значения сопротивления бетона сдвигу вычисляются по формуле: $R_{sq}^* = R_{sq} + (\sigma_{x(y)} + \sigma_{2(3)}) \cos \alpha$ (10)

Если $\frac{\sigma_{2(3)}}{R_b} \geq 0,1$ – напряжения σ_0 не учитываются. Приведенное сопротивление бетона сдвигу определяется по (9) или (10). Выражение для оценки приведенного сопротивления бетона растяжению выглядит следующим образом:

$$R_{bt}^* = R_{bt} + \sigma_0 + \sigma_{2(3)} \quad (11)$$

Физический смысл выражения состоит в увеличении количества этапов последовательного деления клиньев в зависимости от прочности бетона и уровня напряжений поперечного обжатия.

Для оценки прочности бетона в области «сжатия-сжатия» условие (1) с учетом (6–11) запишем в виде:

$$N \leq N_{ult} = \frac{2an(R_{bt} + \sigma_0 + \sigma_{2(3)})(x_c - \frac{l_{loc}}{n} \sin \alpha \cos \alpha) \cos \alpha +}{\sin \alpha} + \frac{2[R_{sq} + (\sigma_0 + \sigma_{2(3)}) \cos \alpha](1 + \sin^2 \alpha) l_{loc}^2}{\sin \alpha} + R_b l_{loc}^2 \sin^4 \alpha. \quad (12)$$

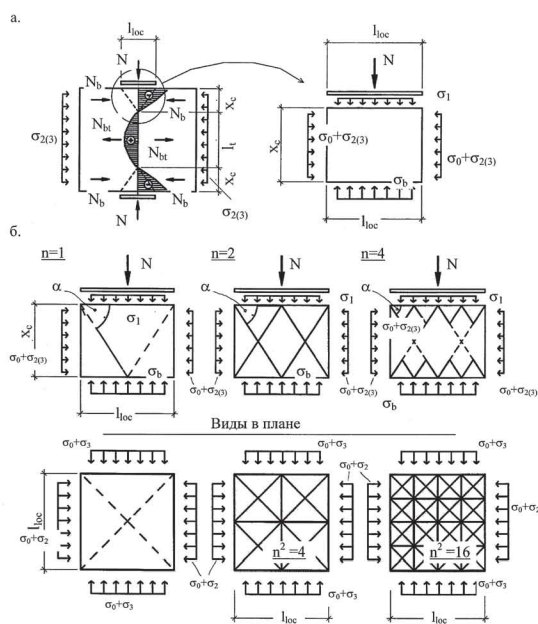


Рис. 4. Построения многоклиновой модели разрушения материала в зоне трехосного сжатия

На рис. 5 показано сравнение опытных и вычисленных по условиям (1) и (12) разрушающих усилий для плоских пенобетонных элементов с полосовым нагружением [3], по которому можно сделать следующие выводы:

– расчетные выражения достаточно близко описывают опытные данные;

– граничным значением применения условий (1), (12) служит соотношение размера грузовой площадки к размерам элемента: при $\frac{l_{loc}}{l} \leq 0,3$ разрушение бетона и элемента происходит в области «сжатия-сжатия». Установленная граница существенно влияет на конструирование зон локального действия нагрузок.

Для случаев двухосного сжатия характерен следующий вариант механизма разрушения. В ходе нагружения поверхности отрыва в средней сжато-растянутой зоне формируются параллельно направлению усилий обжатия, так как деформирование бетона и раскалывание элемента возможно в перпендикулярном, «свободном» направлении (рис. 6).

При этом клин имеет форму треугольной призмы. Для описания данного вида разрушения расчетные выражения физической модели трансформируются следующим образом:

$$N_{bt} = 0,5 A_{bt} (R_{bt} + R_{bt}^*), \quad (13)$$

$$N_{sq} = 0,5 A_{sq} (R_{sq} + R_{sq}^*), \quad (14)$$

где R_{bt}^* , R_{sq}^* определяются по (11), (9) или (10) соответственно.

В результате проведенных исследований получены методики оценки прочности бетона при одно-, двух- и трехосном напряженных состояниях. На рис. 7 приведено сопоставление теоретических результатов с опытными данными по испытаниям образцов из легкого [3] бетона при двух- и трехосном сжатии.

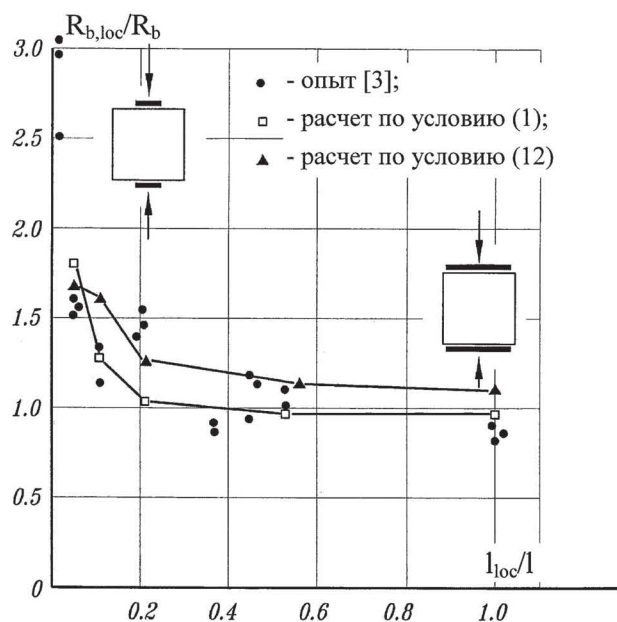


Рис. 5. Сопоставление опытных и теоретических величин

Полученные зависимости определяют области эффективного сопротивления бетона и являются, по сути, критериями прочности. На рис. 8 приведено графическое сопоставление полученных результатов для керамзитобетона с существующими критериями прочности бетонов при трехосном напряженном состоянии.

Очевидно, что полученные с использованием модифицированной физической модели результаты соответствуют существующим представлениям и подходам к оценке прочности бетона в сложных напряженных состояниях. Разработанные

методики позволяют производить оценку прочности бетона при любых соотношениях $\frac{A_{loc}}{A}$ и $\frac{\sigma_{2(3)}}{R_b}$, по сжато-растянутой области в средней зоне и непосредственно под грузовыми площадками.

Литература

1. Соколов Б.С. Новый подход к расчету бетонных элементов при действии местной нагрузки. Бетон и железобетон, 1992, №10. С. 22–25.
2. Соколов Б.С. Теоретические основы сопротивления бетона и железобетона при сжатии // Известия вузов. Строительство. 1993. №9. С. 39–42.
3. Антаков А.Б. Прочность элементов из легких и ячеистых бетонов при местном действии нагрузки. Диссертация кандидата технических наук. Казань, 1999.

Durability of Concrete at Compression.

By B.S. Sokolov, A.B. Antakov

In the article the results of researches in the field of durability of concrete are given. The purpose of the researches is development of a design procedure on the basis of the theory of resistance of anisotropic materials at compression, reflecting features of intense-deformed condition and the character of destruction of concrete.

Ключевые слова: бетон, прочность, местное действие нагрузки, теория, физическая модель разрушения.

Key words: concrete, durability, local action of loading, theory, physical model of destruction.

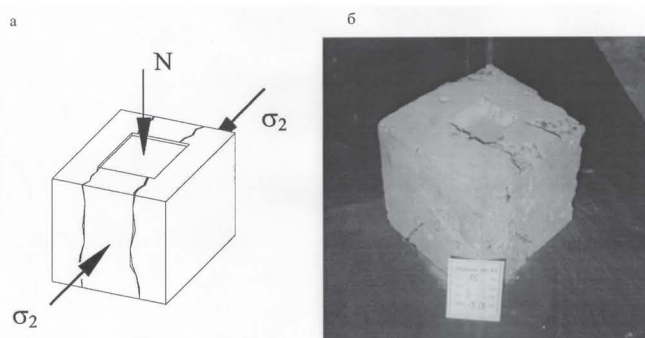


Рис. 6. Характер разрушения бетонного элемента при местном действии нагрузки и одноосном поперечном обжатии

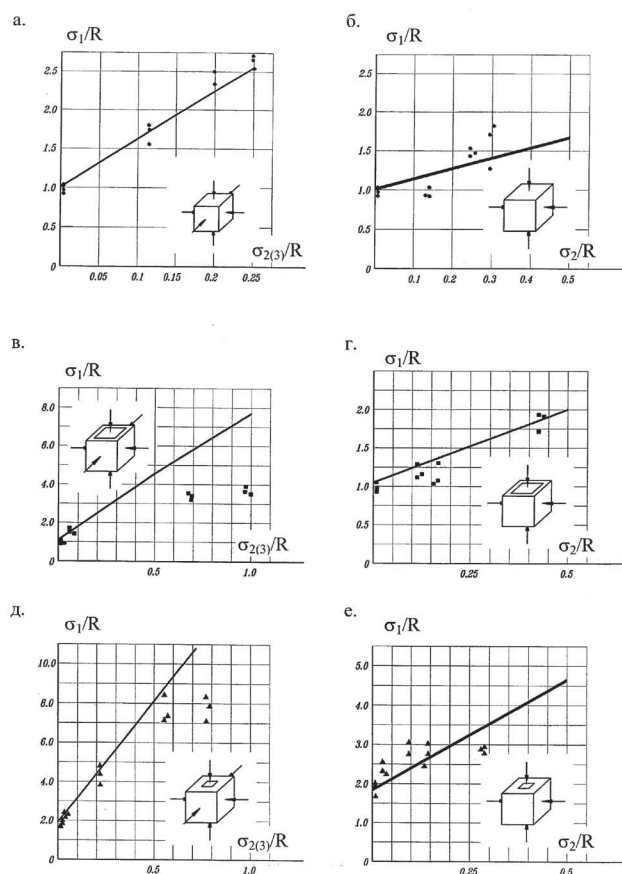
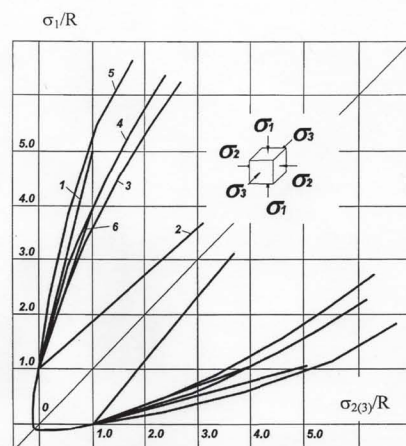


Рис. 7. Сопоставление опытных и теоретических результатов по образцам с величинами соотношения $A_{loc}/A = 1,0$ (а, б), 0,66 (в, г) и 0,33 (д, е)



- 1 – критерий прочности Гвоздева А.А.;
- 2 – критерий прочности Пирадова А.Б.;
- 3–4 – критерии прочности Яшина А.В.;
- 5 – критерий прочности Карпенко Н.И.;
- 6 – критерий прочности по формуле (12).

Рис. 8. Критерии прочности бетонов при трехосном напряженном состоянии