

УДК 624.012.45

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВОЙСТВ ОГРАНИЧЕННОГО БЕТОНА  
ПРИ АНАЛИЗЕ УСИЛЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН**

**USE OF PROPERTIES OF CONFINED CONCRETE  
IN THE ANALYSIS OF STRENGTHEN REINFORCED CONCRETE COLUMNS**

*А.Г. ТАМРАЗЯН*  
A.G. TAMRAZYAN

(Национальный исследовательский  
Московский государственный строительный университет)  
(National Research Moscow State University of Civil Engineering)  
E-mail: tamrazian@mail.ru

*Обозначены преимущества ограниченного бетона. Проведен краткий обзор исследований в области изучения свойств ограниченного бетона.*

*Рассмотрены различные методы реализации трехосного НДС для увеличения несущей способности железобетонных колонн.*

*Рассмотрен принцип работы колонн прямоугольного сечения в условиях объемного НДС, полученного с помощью поперечных хомутов.*

*The advantages of confined concrete are indicated. A brief review of studies in the study of properties of bounded concrete has been carried out.*

*Various methods for the implementation of triaxial stress-strain state to increase the carrying capacity of reinforced concrete columns are considered.*

*The principle of operation of columns of rectangular cross section under conditions of volumetric stress-strain state, obtained using transverse stirrup, is considered.*

**Ключевые слова:** усиление колонн, ограниченный бетон, поперечная арматура, трехосное НДС.

**Keywords:** strength of columns, confined concrete, transverse stirrup, triaxial stress-strain.

В последние годы работа бетона в стесненных условиях начинает получать все более строгое теоретическое обоснование. Бетон, работающий в условиях ограничения поперечных деформаций, имеет значительно большую прочность и пластичность, чем неограниченный бетон. При этом его модуль деформации будет значительно меньше, даже с учетом понижающих коэффициентов [1].

Исследователи в этой области отмечают, что реактивное поперечное давление оказывает благоприятное воздействие на сопротивление появлению и развитию микротрещин. Так, для ограниченного бетона нагрузка, соответствующая моменту появления микротрещин, существенно повышается. А угол наклона их преимущественного развития относительно продольной оси изменяется [2].

Кроме того, сжатые железобетонные элементы нередко подвергаются таким воздействиям, как коррозионные повреждения, пожары, динамические нагрузки [3...7]. Многие аспекты работы конструкций в таких условиях до конца не изучены. Однако с уверенностью можно сказать, что обоснованное использование и учет преимуществ ограниченного бетона в подобных ситуациях значительно повысит сопротивляемость железобетонных элементов указанным негативным факторам.

В настоящее время существует множество различных методов реализации трехосного НДС для увеличения несущей способности железобетонных колонн прямоугольного сечения, такие как: наклеивание композитных материалов, обжатие колонн металлическими листами, обжатие накладками, использование преднапряженной спиралевидной арматуры.

Все они в различной мере эффективны для повышения несущей способности колонн. Например, при использовании спиралевидной арматуры в колоннах можно достигнуть эффекта усиления до 40%. Усиление

затяжками с двухосным предварительным обжатием бетона увеличивает несущую способность на 30,8%. Наибольшие значения превышения несущей способности над контрольными образцами были получены при усилении затяжками с диагональными тягами, расположенными в одном уровне – 40% [8].

При усилении колонн с использованием углепластикового волокна достигается меньший эффект – до 10%.

Помимо случаев с применением конструктивных мероприятий, бетон может испытывать стесненную деформацию при определенном виде нагрузки. В отечественных нормативных документах при местном сжатии (смятии) предусматривается возможное увеличение прочности бетона до 2,5 раз по сравнению с призменной, в зависимости от отношения максимальной расчетной площади к площади смятия.

Таким образом, разработка способов создания ограниченного состояния для бетона прямоугольных колонн с помощью поперечных хомутов различной формы имеет хорошие перспективы и заслуживает более пристального внимания со стороны исследователей.

Однако на сегодняшний день это направление не получило широкого развития в отечественной науке. Основная проблема заключается в отсутствии общепринятой методики расчета такого вида усиления колонн.

Обратившись к зарубежной литературе, можно отметить, что исследования в этой области резко увеличились в связи с осуществлением ряда прорывов в описании свойств ограниченного бетона.

В [9] предложена первая модель, связывающая поперечное давление ограниченного бетона с его прочностью на сжатие:

$$R_{cb} = R_b + k_1 f_1, \quad (1)$$

где  $R_{cb}$  – прочность ограниченного бетона;  $R_b$  – прочность неограниченного бетона;  $k_1$  – эмпирический коэффициент;  $f_1$  – поперечное давление ограниченного бетона.

В [10] проведена работа, целью которой явилось представление кривой НДС ограниченного бетона. Была проведена серия экспериментов, в которых в качестве переменных рассматривались отношение объема стальных хомутов к объему бетонного ядра и прочности бетона. Была получена кривая, состоящая из трех линейных участков с разным углом наклона (рис. 1). Первый участок отражал упругую стадию деформирования, остальные два – пластическую. Однако не было представлено информации, от чего зависит угол наклона пластических участков.

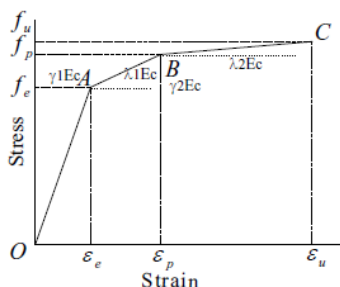


Рис. 1

В [11] проведены эксперименты, в которых переменными были расстояние между хомутами и количество продольной арматуры. Сделан вывод, что при использовании прямоугольных хомутов нет увеличения несущей способности бетона. Однако было отмечено значительное увеличение пластичности.

В [12] исследователи предложили новую модель. Главными параметрами в серии экспериментов были шаг хомутов, эффективный шаг хомутов, площадь хомутов и геометрия сечения, которая имела три переменные: площадь сжатого ограниченного бетона, площадь сжатого неограниченного бетона и ширина сечения. Полученный график имел три участка: первый – восходящая кривая, которая оканчивается в точке достижения прочности неограниченного бетона, второй – прямая, параллельная оси  $x$ , длина которой зависит от степени ограничения бетона, и третий – нисходящая

прямая, оканчивающаяся в точке с предельной деформацией (рис. 2).

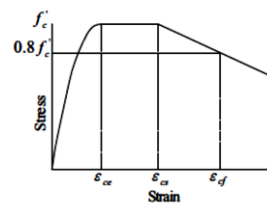


Рис. 2

В [13] проводились исследование на бетоне низкой и средней прочности без продольного армирования. Используемая поперечная арматура имела различные размеры, а также разные уровни предельных напряжений и напряжений текучести. Главными переменными, влияющими на результаты, были объемное отношение поперечной арматуры к бетонному ядру, прочность неограниченного бетона, отношение шага хомутов к ширине бетонного ядра и напряжение текучести поперечной арматуры.

Зависимость являлась нелинейной:

$$R_{cb} = k_3 R_b \left[ \frac{Ax + (m-1)x^2}{1 + (A-2)x + mx^2} \right]. \quad (2)$$

В [14] предположили, что максимальная прочность ограниченного и обычного бетона одинакова. Они предположили, что ограниченный бетон может выдерживать деформацию до бесконечности при постоянном напряжении  $0,2f_c'$  (рис. 3).

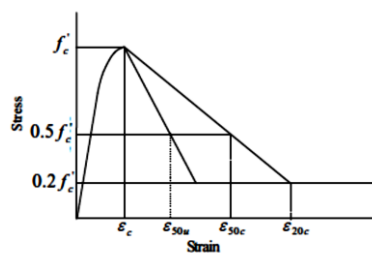


Рис. 3

Для восходящего участка:

$$R_{cb} = R_b \left[ \frac{2\epsilon_{cb}}{\epsilon_{b0}} - \left( \frac{\epsilon_b}{\epsilon_{b0}} \right)^2 \right]. \quad (3)$$

Для нисходящего участка:

$$R_{cb} = R_b \left[ 1 - Z(\epsilon_b - \epsilon_{b,o}) \right] \quad (4)$$

В [15] был сделан вывод о том, что на кривую НДС влияют такие факторы, как условия эксперимента и возраст бетона. С учетом этого была скорректирована расчетная модель:

$$R_{cb} = R_b \frac{\epsilon_b}{\epsilon_{cb}} \frac{n}{n-1 + \left( \frac{\epsilon_b}{\epsilon_{cb}} \right)^n} \quad (5)$$

В [16] была представлена модель на основе свойств кольцевой арматуры и определяющих зависимостей обычного бетона. В экспериментах использовался легкий и тяжелый бетон. Нагрузка прикладывалась в одну ступень. В образцах не было продольной арматуры, и главными параметрами исследования были шаг поперечной арматуры и ее напряжение текучести. Было показано, что спиральная поперечная арматура становится неэффективной, когда ее шаг превышает 1,25 диаметра колонны из ограниченного бетона. Также стало ясно, что эффективность спиральной арматуры обратно пропорциональна прочности на сжатие неограниченного бетона.

В [17] исследователи предположили, что максимальная несущая способность ограниченного бетона достигается в момент, когда в защитном слое начинают появляться сколы. Были проведены эксперименты с высокопрочным бетоном. В качестве переменных были ограничивающее давление и прочность бетона.

Были предложены два уравнения для описания нисходящей и восходящей модели, в которые включались две константы А и К. Константы зависели от модуля упругости, от сопротивления сжатию с учетом обжатия и соответствующих деформаций, а также давления в армировании обжатия, которое описывалось разными уравнениями для круглых и квадратных колонн.

Для восходящей ветви:

$$R_b = R_{cb} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\epsilon_b}{\epsilon_{cb}} \right)^A \right] \quad 0 \leq \epsilon_b \leq \epsilon_{cb}, \quad (6)$$

для нисходящей ветви:

$$R_b = R_{cb} \exp \left[ -k(\epsilon_b - \epsilon_{bo})^{1.15} \right] \quad \epsilon_{cb} \leq \epsilon_b \quad (7)$$

В [18] пришли к выводу, что пассивное поперечное давление, возникающее из-за бокового расширения бетона и сдерживающего влияния поперечной арматуры, не всегда одинаково (рис.4).

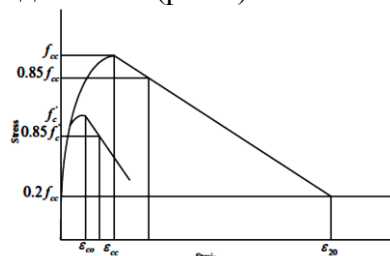


Рис. 4

Основываясь на испытаниях обычного и высокопрочного бетона с прочностью от 30 до 130 МПа, они предложили новую модель, которая имела экспоненциальную зависимость между боковым ограничивающим давлением и пиковой прочностью ограниченного бетона. Были проведены тесты с варьированием объемного отношения, шага хомутов, напряжений текучести в них, размещения поперечной арматуры и геометрии сечения. В дополнение к этому была подчеркнута важность вопроса размещения поперечных хомутов как определяющего параметра пиковой прочности ограниченного бетона.

Для круглых сечений:

$$R_{cb} = R_b + k_1 f_1, \quad (8)$$

где  $k_1 = 6,7(f_1)^{-0,17}$ ;  $f_1 = \frac{2A_s f_{yh}}{d_s}$ .

Для прямоугольных сечений:

$$R_{cb} = R_b + k_1 f_{le}. \quad (9)$$

В [19] в результате изучения пластичности и прочности ограниченного бетона был сделан вывод о том, что пластичность более чувствительна к количеству поперечной арматуры, чем прочность. Увеличение проч-

ности бетона, благодаря ограничению, наблюдалось в пределах  $(2,1 \dots 4)f_1$ , где  $f_1$  – поперечное давление.

## ВЫВОДЫ

1. Эффективность круглых колонн с использованием хомутов из композитных материалов выше, чем прямоугольных.
2. Спиральные и круглые хомуты в колоннах более эффективны, чем прямоугольные. Однородное распределение напряжений – одна из причин этого преимущества.
3. Скорость поперечного расширения бетона уменьшается после достижения определенного значения относительной деформации.
4. Большинство диаграмм деформирования ограниченного бетона с использованием композитных материалов получены эмпирически.
5. Двухлинейная восходящая кривая деформирования бетона, усиленная композитным материалом, подтверждается большинством авторов.
6. Определено значение наименьшего значения обжатия, то есть бетон с недостаточным обжатием ведет себя как обычный бетон.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Тамразян А.Г., Манаенков И.К. Учет свойств ограниченного бетона при расчете несущей способности плит перекрытий [Электронный ресурс] // Строительство: наука и образование. 2014. № 1. Ст. 2. Режим доступа: <http://www.nso-journal.ru>.
2. Зайцев Ю.В. Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушений. – М.: Стройиздат, 1982.
3. Тамразян А.Г. Бетон и железобетон: проблемы и перспективы // Промышленное и гражданское строительство. – 2014, № 7. С. 51...54.
4. Tamrazyan A., Avetisyan L. Estimation of Load Bearing Capacity of Eccentrically Compressed Reinforced Concrete Elements Under Dynamic Loading in Fire Conditions // Applied Mechanics and Materials. – V. 638...640, 2014. P. 62...65.
5. Tamrazyan A. Reduce the impact of dynamic strength of concrete under fire conditions on bearing capacity of reinforced concrete columns // Applied Mechanics and Materials. – V.475...476, 2014. P.1563...1566.
6. Тамразян А.Г. Динамическая устойчивость сжатого железобетонного элемента как вязкоупругого стержня // Вестник МГСУ. – 2011, № 1-2. С.193...196.

7. Тамразян А.Г. Оценка риска и надежности несущих конструкций и ключевых элементов – необходимое условие безопасности зданий и сооружений // Вестник ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко "Исследования по теории сооружений". – 2009, № 1. С. 160...171.

8. Аман Эль Дин Маамун Дауд. Усиление железобетонных колонн предварительно напряженными элементами и методы их расчета: Дис.... канд. техн. наук. – Ростов-на-Дону, 1993.

9. Richart F.E., Brandtzaeg A. and Brown R.L. (1929). The failure of plain and spirally reinforced concrete in compression // Bulletin № 190, Engineering Station, University of Illinois, Urbana.

10. Chan W.W.L. The Ultimate Strength and Deformation of Plastic Hinges in Reinforcement Concrete Frameworks // Magazine of Concrete Research (London). – V. 128, № 12, 1955. P. 1551...1564.

11. Soliman M.T.M. and Yu C.W. The Flexural Stress-Strain Relationship of Concrete Confined by Rectangular Transverse Reinforcement // Magazine of Concrete Research (London). – V.19, № 61, 1967. P.223...228, Dec. 1967.

12. Roy H.E.H. and Sozen M.A. Ductility of Concrete. Flexural Mechanics of Reinforced Concrete, SP-12, American Concrete Institute // American Society of Civil Engineers. – Detroit, 1965. P. 213...224.

13. Sargin M. (1971). Stress-Strain Relationships for Concrete and the Analysis of Structural Concrete Sections // Solid Mechanics Division, University of Waterloo, Study № 4.

14. Kent D. and Park R. Flexural Members with Confined Concrete // Journal of structural Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. – V.97, № ST7, 1973. P 1969...1990, July 1971.

15. Popovics S.A Numerical Approach to the Complete Stress-Strain Curves of Concrete // Cem. Concr. Res. – 3(5), 1973. P. 583...590.

16. Ahmad S.H. and Shah S.P. Stress-Strain Curves of Concrete Confined by Spiral Reinforcement // ACI J. – 79(6), 1982. P. 484...490.

17. Fafitis A. and Shah S.P. Lateral Reinforcement for High-Strength Concrete Columns // ACI Special Publication/ – SP 87-12, 1985. P.213...232.

18. Saatcioglu M. and Razvi S.R. Strength and Ductility of Confined Concrete // J. Struct. Eng. – 118(6), 1992. P. 1590...1607.

19. Sheikh S.A. and Toklucu M.T. (1993). Reinforced concrete columns confined by circular spirals and hoops // ACI J. – 90(5), 1993. P. 542...553.

## REFERENCES

1. Tamrazjan A.G., Manaenkov I.K. Uchet svoystv ogranichenogo betona pri raschete nesushhej sposobnosti plit perekrytij [Jelektronnyj resurs] // Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie. 2014. № 1. St. 2. Rezhim dostupa: <http://www.nso-journal.ru>.
2. Zajcev Ju.V. Modelirovanie deformacij i prochnosti betona metodami mehaniki razrushenij. – M.: Strojizdat, 1982.

3. Tamrazjan A.G. Beton i zhelezobeton: problemy i perspektivy // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2014, № 7. S. 51...54.
4. Tamrazyan A., Avetisyan L. Estimation of Load Bearing Capacity of Eccentrically Compressed Reinforced Concrete Elements Under Dynamic Loading in Fire Conditions // Applied Mechanics and Materials. – V. 638...640, 2014. P. 62...65.
5. Tamrazyan A. Reduce the impact of dynamic strength of concrete under fire conditions on bearing capacity of reinforced concrete columns // Applied Mechanics and Materials. – V.475...476, 2014. P.1563...1566.
6. Tamrazjan A.G. Dinamicheskaja ustojchivost' szhatogo zhelezobetonnogo jelementa kak vjazko-uprugogo sterzhnja // Vestnik MGSU. – 2011, № 1-2. S.193...196.
7. Tamrazjan A.G. Ocenka riska i nadezhnosti nesushhih konstrukcij i ključevykh jelementov – neobhodimoe uslovie bezopasnosti zdaniy i sooruzhenij // Vestnik CNIISK im. V.A. Kucherenko "Issledovanija po teorii sooruzhenij". – 2009, № 1. S. 160...171.
8. Aman Jel' Din Maamun Daud. Usilenie zhelezobetonnykh kolonn predvaritel'no naprjazhennymi jelementami i metody ih rascheta: Dis.... kand. tehn. nauk. – Rostov- na-Donu, 1993.
9. Richart F.E., Brandtzaeg A. and Brown R.L. (1929). The failure of plain and spirally reinforced concrete in compression // Bulletin № 190, Engineering Station, University of Illinois, Urbana.
10. Chan W.W.L. The Ultimate Strength and Deformation of Plastic Hinges in Reinforcement Concrete Frameworks // Magazine of Concrete Research (London). – V. 128, № 12, 1955. P. 1551...1564.
11. Soliman M.T.M. and Yu C.W. The Flexural Stress-Strain Relationship of Concrete Confined by Rectangular Transverse Reinforcement // Magazine of Concrete Research (London). – V.19, № 61, 1967. P.223...228, Dec. 1967.
12. Roy H.E.H. and Sozen M.A. Ductility of Concrete. Flexural Mechanics of Reinforced Concrete, SP-12, American Concrete Institute // American Society of Civil Engineers. – Detroit, 1965. P. 213...224.
13. Sargin M. (1971). Stress-Strain Relationships for Concrete and the Analysis of Structural Concrete Sections // Solid Mechanics Division, University of Waterloo, Study № 4.
14. Kent D. and Park R. Flexural Members with Confined Concrete // Journal of structural Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. – V.97, № ST7, 1973. P 1969...1990, July 1971.
15. Popovics S.A Numerical Approach to the Complete Stress-Strain Curves of Concrete // Cem. Concr. Res. – 3(5), 1973. P. 583...590.
16. Ahmad S.H. and Shah S.P. Stress-Strain Curves of Concrete Confined by Spiral Reinforcement // ACI J. – 79(6), 1982. P. 484...490.
17. Fafitis A. and Shah S.P. Lateral Reinforcement for High-Strength Concrete Columns // ACI Special Publication/ – SP 87-12, 1985. P.213...232.
18. Saatcioglu M. and Razvi S.R. Strength and Ductility of Confined Concrete // J. Struct. Eng. – 118(6), 1992. P. 1590...1607.
19. Sheikh S.A. and Toklucu M.T. (1993). Reinforced concrete columns confined by circular spirals and hoops // ACI J. – 90(5), 1993. P. 542...553.

Рекомендована кафедрой железобетонных и каменных конструкций. Поступила 15.04.18.