

УДК 624.012.4-183.2

К ВОПРОСУ ПРОЧНОСТИ БЕТОНОВ НОРМАЛЬНОГО ВЕСА ПРИ ДВУХОСНОМ СЖАТИИ

С. В. Цветков¹, С. С. Цветков²

¹ К. т. н., главный конструктор, ООО «ПетербургРеставрация», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: vasilieva4@yandex.ru

² Студент, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: tsvetkov.svyatoslav@yandex.ru

Реферат

В статье приводятся результаты исследования изменения прочности бетонов нормального веса при двухосном сжатии по результатам моделирования, а также выполнено сравнение с экспериментальными данными и теоретическими исследованиями других авторов.

Несмотря на большое количество имеющегося экспериментального и теоретического материалов, вопрос прочности бетона в условиях двухосного сжатия до настоящего времени остается открытым.

Существующие зависимости, которые определяют прочность бетона при двухосном сжатии, получены экспериментально и являются эмпирическими. Но отсутствие единой методики проведения испытаний, применяемого оборудования, формы образцов существенно влияют на результаты, усложняя их совместное рассмотрение. Сами же результаты указывают как на повышение прочности бетона при двухосном сжатии, так и на понижение. Следовательно, нужны теоретические исследования поведения бетона в указанном напряженном состоянии, которые могут раскрыть причины изменения прочности, и в дальнейшем позволят определить направления экспериментальных исследований.

Применение в теоретических исследованиях методов теории упругости и механики разрушения требуют привлечения сложного математического аппарата. Бетон, являясь анизотропным материалом, имеет в своей структуре большое количество неоднородных включений в виде пор и зерен крупного заполнителя, что делает применение этих методов затруднительным.

В материалах статьи представлена модель для одноосного и двухосного сжатия бетона, основанная на применении теории протекания – математической теории, описывающей возникновение связанных структур в случайных средах. В исходную модель внесены некоторые изменения и дополнения, сохраняющие в целом общий подход. Результаты моделирования указывают на наличие устойчивого роста прочности бетона при двухосном сжатии по сравнению с одноосным сжатием.

Применение представленной модели, с нашей точки зрения, позволяет определить причины изменения прочности бетона в условиях двухосного сжатия и дать этому факту количественную оценку.

Ключевые слова: бетон нормального веса, одноосное сжатие, двухосное сжатие, теория протекания, случайный процесс, изменение прочности, единая методика, разрушение бетона.

ON THE STRENGTH OF NORMAL WEIGHT CONCRETES IN BIAXIAL COMPRESSION

S. V. Tsvetkov, S. S. Tsvetkov

Abstract

The article presents the results of a study of the change in the strength of normal-weight concretes under biaxial compression based on modeling results, and compares them with experimental data and theoretical studies by other authors.

Despite the large number of available experimental and theoretical materials, the issue of concrete strength under biaxial compression remains open to this day.

The existing dependencies that determine the strength of concrete under biaxial compression were obtained experimentally and are empirical. The lack of a unified testing methodology, the equipment used, and the shape of the samples significantly affect the results, complicating their joint consideration. The results themselves indicate both an increase in the strength of concrete under biaxial compression and a decrease. Consequently, theoretical studies of the behavior of concrete in the specified stress state are needed, which can reveal the causes of strength changes and will further determine the directions of experimental research.

The application of elasticity theory and fracture mechanics methods in theoretical studies requires the use of complex mathematical apparatus. Concrete, being an anisotropic material, has a large number of heterogeneous inclusions in its structure in the form of pores and grains of large aggregate, which makes the application of these methods difficult.

The article presents a model for uniaxial and biaxial compression of concrete based on the application of percolation theory – a mathematical theory describing the occurrence of related structures in random environments. Some changes and additions have been made to the original model, while generally preserving the general approach. The modeling results indicate the presence of a steady increase in the strength of concrete under biaxial compression compared to uniaxial compression.

The application of the presented model, in our opinion, allows us to determine the causes of changes in the strength of concrete under biaxial compression and to give a quantitative assessment of this fact.

Keywords: normal weight concrete, uniaxial compression, biaxial compression, flow theory, random process, strength change, uniform technique, concrete destruction.

Введение

Новые методы расчета конструкций требуют наличия достоверной информации о прочностных характеристиках бетона в различных напряженных состояниях. Одним из таких состояний является двухосное сжатие бетона. Несмотря на то, что исследования бетона в этом направлении проводятся уже более ста лет, в получаемых экспериментальных результатах фиксируется как снижение прочности по сравнению с осевым сжатием, так и ее повышение в 1,5–2,0 раза [3, 7, 11]. Эти отклонения связаны, в том числе с условиями проведения испытаний [12, 14].

Единая методика проведения испытаний представлена в Рекомендациях по определению прочностных и деформативных характеристик бетона при неоднородных напряженных состояниях (далее – Рекомендации НИИЖБа)¹.

¹ Рекомендации по определению прочностных и деформативных характеристик бетона при неоднородных напряженных состояниях. – М.: Госстрой СССР, 1986. – 72 с.

Бетон является в своей основе неоднородным материалом. В растворной части (матрице) распределены включения: поры различной формы и размеров, зерна крупного заполнителя, свойства которых отличны от матрицы. Это приводит к концентрации напряжений вокруг включений, искажающих поля напряжений от внешних нагрузок, что значительно затрудняет или делает невозможным применение методов классической теории упругости [5, 13].

Моделирование поведения бетона в различных напряженных состояниях с использованием механики разрушения и статистических законов распределения включений для определения его прочностных характеристик, представлены в работе [8]. Следует отметить, что такое моделирование связано с использованием сложного математического аппарата при наличии целого ряда допущений.

В статье представлено исследование прочности бетонов нормального веса в условиях двухосного сжатия ($\sigma_1 \neq 0$; $\sigma_3 \neq 0$; $\sigma_2 = 0$) с использованием модели, ранее подробно описанной в [20] для сжатия – растяжения.

Методы

В основу расчетной модели положена «задача узлов», рассматриваемая в теории «протекания» – математической теории, применяемой в физике и химии для анализа и изучения процессов, происходящих в неоднородных средах, характеристики которых являются случайными величинами [16].

Например, для исследования электропроводности смеси, задается «система», в простейшем случае – квадратная решетка, каждый узел которой не является электропроводящим. Узлы являются независимыми, в том смысле, что изменение свойств одного не влияет на свойства другого.

Общее количество узлов в решетке – N_0 . Случайным образом узлам последовательно «назначаются» электропроводящие свойства. Если рядом с «электропроводным» узлом появляется узел, обладающий также «электропроводными» свойствами, они соединяются между собой. С ростом количества «электропроводных» узлов, появляется непрерывная цепочка из «электропроводных» узлов, соединяющих один край системы с другой – система становится «электропроводной». Количество узлов N_{ys} , при котором происходит изменение свойств решетки, называется «пороговым», а отношение N_{ys}/N_0 характеризует «пороговый переход».

В исходную модель «теории протекания» были внесены следующие дополнения.

1. В «теории протекания» узел имеет только определенные свойства (например, узел «электропроводный» или нет).

Для принятой модели каждому узлу решетки присваивалось случайное числовое значение «прочности». «Прочности» узлов, являясь независимыми случайными величинами, распределены по нормальному закону распределения.

Характеристиками нормального распределения являются: среднее значение (математическое ожидание) и среднее квадратическое отклонение (СКО):

– за среднее значение (математическое ожидание) была принята средняя прочность бетона, полученная по результатам испытаний на осевое сжатие бетонных призм – f_{cm} ;

– определение среднего квадратического отклонения приведено в [20]. В общем, значение СКО определяется положением нижней параметрической точки R_{T^0} , фиксирующейся при осевом сжатии бетона. Эти напряжения определяют начало нарушения структуры бетона. По данным [8], при напряжениях ниже нижней параметрической точки, с обеспеченностью не менее 95 %, нарушения в структуре бетоне, связанные с его нагружением, отсутствуют. Тогда, если «прочность» узлов является случайной величиной и имеет нормальный закон распределения, можно принять, что с доверительной вероятностью 95,4 % все значения этой величины отклоняются от математического ожидания на величину двух средних квадратических отклонений и расположены в интервале $(f_{cm} - 2\sigma; f_{cm} + 2\sigma)$, где σ – среднее квадратическое отклонение (СКО). Иными словами, $\sigma = (f_{cm} - R_{T^0})/2$. Далее, чтобы не путать напряжения с СКО, оно обозначено как D .

2. В теории протекания случайным образом менялись исходные свойства узлов: одни из них удовлетворяли условию электропроводности, а другие – нет. Постепенно, меняя свойства узлов, решетка переходит из «неэлектропроводного» состояния в «электропроводное».

В нашем случае для модели поэтапно задавалась фиксированная «внешняя нагрузка», меняющая состояние узла – «неразрушенный» или «разрушенный», т. е. если «нагрузка» превышала «прочность» узла, он считался «разрушенным».

3. Появление непрерывной цепочки «разрушенных» узлов, пересекающих исходную решетку, считалось наступлением «разрушения» всей решетки.

«Окно» программы для реализации описанной модели, приведено на рисунке 1: в качестве примера задана решетка размером 10×10 ячеек, математическое ожидание (среднее значение) – $f_{cm} = 26,4$ МПа; среднее квадратическое отклонение (СКО) $D = 8,62$ МПа; текущий уровень «нагрузки» $\sigma_{c,i} = 0,7$, $f_{em} = 18,64$ МПа; шаг «нагрузки» – $0,5$ МПа; при заданном уровне «нагрузки» количество «разрушенных» узлов – 16 штук.

Порядок построения модели для осевого сжатия.

1. «Прочность» элементов структуры r_i распределена по нормальному закону со следующими характеристиками: математическое ожидание f_c , среднее квадратическое отклонение – $D = (f_{cm} - R_{T^0})/2$. Определение параметрических точек выполнялось по рекомендациям [1] для осевого сжатия, что в целом совпадает данными, приведенными в [4, 15].

f_{em} определялось в соответствии с Рекомендациями НИИЖБа.

2. Из выборки, с указанными в п. 1 характеристиками, случайным образом берутся значения r_i , которые помещаются в узлы квадратной решетки. Последовательно задавалось «внешнее воздействие» $\sigma_{c,i}$.

3. При $\sigma_{c,i} > r_i$, узел считался «разрушенным». «Разрушенные» узлы, расположенные рядом друг с другом, образуют «цепочку». Когда связанная цепочка «пересекает» всю решетку, это считается «разрушением». При «разрушении» фиксируется общее количество «разрушенных» узлов N_{max} и значение «напряжений» $\sigma_{c, max}$, соответствующих «разрушению». Реализация одной из решеток представлена на рисунке 2: $N_{max} = 57$ штук; $\sigma_{c, max} = 27,0$ МПа.



Рисунок 1 – «Окно» программы

| | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 33.7 | 34.9 | 33.1 | 31.1 | 36.1 | 30.2 | 32.2 | 38.1 | 34.9 | 32.5 |
| 22.2 | 31.8 | 19.7 | 37.9 | 24.1 | 35.3 | 38.4 | 43.4 | 24.4 | 20.6 |
| 25.9 | 30.4 | 32.0 | 23.2 | 31.1 | 49.5 | 16.5 | 17.3 | 21.0 | 37.9 |
| 17.9 | 23.4 | 13.2 | 28.1 | 20.1 | 28.2 | 29.6 | 22.4 | 37.6 | 30.3 |
| 10.8 | 30.6 | 20.8 | 32.7 | 32.7 | 16.4 | 34.5 | 48.6 | 30.4 | 40.8 |
| 7.8 | 54.4 | 38.5 | 29.7 | 25.8 | 24.7 | 29.9 | 16.0 | 23.0 | 18.4 |
| 19.7 | 19.0 | 36.1 | 28.7 | 25.7 | 12.5 | 27.6 | 21.1 | 37.3 | 16.8 |
| 20.8 | 26.6 | 23.1 | 14.6 | 25.3 | 9.6 | 13.9 | 21.2 | 27.7 | 7.7 |
| 11.3 | 17.6 | 30.3 | 25.1 | 21.6 | 27.7 | 22.2 | 18.7 | 14.7 | 26.1 |
| 31.3 | 15.3 | 36.2 | 26.5 | 34.8 | 31.4 | 20.0 | 29.9 | 20.7 | 27.1 |

Решетка 10 × 10; прочность бетонных призм – $f_{cm} = 26,4$ МПа; «разрушающее» напряжение $\sigma_{c, max} = 27,0$ МПа; число разрушенных узлов $N_{max} = 57$ штук
Рисунок 2 – Реализация одной из решеток

Описанная выше модель, соответствующая осевому сжатию, в теории протекания определена, как «неориентированное протекание». Назовем этот случай «неориентированным разрушением».

Для двухосного сжатия используется задача теории протекания, соответствующая так называемому «ориентированному протеканию» – процессу, при котором элементы системы (узлы решетки) переходят из одного состояния в другое, образуя непрерывную цепочку от одного края решетки в другой в строго определенном направлении.

Используется тот же порядок составления модели с единственным отличием – рассматривается строго определенное направление расположения «разрушенных» узлов – «ориентированное разрушение», что характерно для двухосного сжатия [10].

Реализация модели при указанных выше характеристиках нормального распределения приведена на рисунке 3.

Следует отметить при «ориентированном разрушении» наблюдается, как увеличение общего количества разрушенных узлов – $N_{max} = 71$ штук, так и рост «разрушающего» напряжения – $\sigma_{c, max} = 32,5$ МПа.

| | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 21.3 | 34.1 | 53.5 | 20.3 | 14.4 | 28.3 | 31.6 | 9.7 | 41.0 | 30.9 |
| 21.1 | 38.3 | 28.9 | 33.5 | 23.0 | 39.3 | 15.0 | 33.3 | 26.8 | 49.1 |
| 30.1 | 27.7 | 24.7 | 21.5 | 23.3 | 20.3 | 17.8 | 21.7 | 15.6 | 32.2 |
| 41.0 | 25.3 | 33.0 | 19.7 | 36.8 | 41.0 | 24.0 | 14.1 | 39.0 | 34.0 |
| 34.5 | 19.0 | 17.2 | 27.5 | 38.1 | 39.6 | 20.1 | 35.8 | 20.0 | 24.4 |
| 44.4 | 29.1 | 21.7 | 27.1 | 14.4 | 16.7 | 30.1 | 34.9 | 41.3 | 26.4 |
| 40.4 | 28.7 | 26.2 | 23.8 | 24.6 | 25.3 | 16.8 | 34.0 | 40.9 | 28.4 |
| 30.3 | 25.1 | 43.9 | 28.7 | 26.4 | 27.4 | 24.2 | 16.5 | 24.4 | 30.6 |
| 22.8 | 42.1 | 23.4 | 25.4 | 20.0 | 15.8 | 42.2 | 26.8 | 30.8 | 20.3 |
| 26.5 | 18.2 | 14.2 | 34.3 | 34.2 | 31.5 | 27.8 | 21.3 | 21.0 | 31.4 |

Решетка 10 × 10; прочность бетонных призм – $f_{cm} = 26,4$ МПа; «разрушающее» напряжение $\sigma_{c, max} = 32,7$ МПа; число разрушенных узлов $N_{max} = 71$ штук
Рисунок 3 – «Ориентированное» разрушение

Для построения графика зависимости прочности бетона при двухосном сжатии, необходимо рассмотреть следующие модели:

1) модель осевого сжатия – «неориентированное разрушение» решетки;

2) модель двухосного сжатия – «ориентированное разрушение» решетки – два случая (а и б);

3) модель осевого сжатия с учетом частичного увеличения прочности узлов.

Пункт 1. Реализуется модель осевого сжатия – «неориентированное разрушение». Результат моделирования – значение прочности бетона при осевом сжатии, определяемое по результатам моделирования в зависимости от «прочности» каждой решетки.

Пункт 2а. Моделируя равномерное двухосное сжатие, когда $\sigma_1 = \sigma_2$, «разрушение» решетки должно происходить по наиболее «слабому направлению». По результатам моделирования определяется среднее значение «прочности», соответствующее случаю $\sigma_1 = \sigma_2$.

Пункт 2б. При $\sigma_1 \neq \sigma_2$ разрушение решетки может происходить, как по наименее «прочному», так и наиболее «прочному направлению». Для каждой решетки моделировалось два случая «ориентированного разрушения»: последовательно, по двум взаимно перпендикулярным направлениям – наиболее и наименее «прочному». В результате «прочность» решетки определялась как среднее между этими двумя значениями.

Пункт 3. Сжатие по второму направлению меняет поля напряжений в структуре бетона. В теории упругости исследовались поля напряжений в пластинах с круглыми и овальными отверстиями для случаев двухосного растяжения, двухосного сжатия и сжатия с растяжением. Имеются решения для включений с различными характеристиками. В реальных условиях распределение пор и включений в бетоне, а, следовательно, и распределение полей напряжений, носят случайный характер и практически не подлежат анализу [6].

Учитывая вышеизложенное, целесообразно при моделировании использовать допущения, позволяющие не привлекать сложный математический аппарат.

Рассмотрим решетку «с неориентированным разрушением», в узлы которой поместим значения «прочности» узлов, отличающиеся от начальных на величину, зависящую от бокового обжатия σ_3 . Новая прочность узла составит $r_{i2} = r_i + f(\sigma_3)$. Примем значение второго слагаемого не постоянным, а переменным и определяемым как $f(\sigma_3) = \sigma_3 \cos \alpha_i$. Тогда новое значение прочности узла: $r_{i2} = r_i + \sigma_3 \cos \alpha_i$. В модели это учитывается добавлением к прочности узла величины $\Delta\sigma_\alpha = \sigma_3 \cos \alpha$ (значения угла α принимались дискретными: $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ и 90°). Схема для определения величины $\Delta\sigma_\alpha$ представлена на рисунке 4.

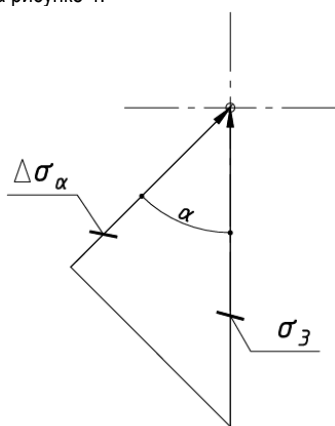


Рисунок 4 – Схема определения $\Delta\sigma_\alpha$

Результаты моделирования

Моделирование выполнялось для бетонов, для которых представлены эмпирические зависимости прочности бетона при двухосном сжатии [9]: $f_c = 10,0$ МПа и $f_c = 50,0$ МПа.

Используя Рекомендации НИИЖБа и [1], для бетонов получены следующие характеристики:

- бетон нормального веса со средней прочностью призм на осевое сжатие $f_{cm} = 10,0$ МПа; значение нижнего параметрического уровня $-Rr^0 = 0,2 f_{cm}$; $D = (f_{cm} - Rr^0)/2 = 4,0$ МПа;

- бетон нормального веса с прочностью $f_{cm} = 50,0$ МПа; значение нижнего параметрического уровня $-Rr^0 = 0,445 f_{cm}$; $D = (f_{cm} - Rr^0)/2 = 14,0$ МПа.

Рассмотрим порядок построения зависимости прочности бетона при двухосном сжатии для бетона $f_{cm} = 10,0$ МПа по рисунку 5.

Моделирование выполнялось на двадцати решетках размером 20×20 ячеек.

По п. 1. Точка графика (1), соответствующая значению напряжений бокового обжатия $\sigma_3 = 0$. Среднее значение прочности по результатам моделирования:

$$- f_{cm, mod} = \sum f_{cmi, mod} / n = 218,0 / 20 = 10,9 \text{ МПа.}$$

По п. 2а. По результатам моделирования («ориентированное разрушение») при напряжениях бокового обжатия $\sigma_1 = \sigma_3$, минимальное значение «прочности» составляет:

$$- f_{cm2, mod} = \sum f_{cmi, mod} / n = 282,0 / 20 = 14,1 \text{ МПа.}$$

На рисунке 5 представлена прямая $\sigma_1 / f_{cm2, mod} = 14,1 / 10,9 = 1,29$, пересекающая «диагональную» прямую в точке 2.

По п. 2б – $\sigma_1 \neq \sigma_3$. «Ориентированное разрушение», соответствующее наибольшей «прочности», дает значение «прочности» – $f_{cm2, mod} = \sum f_{cmi, mod} / n = 298,0 / 20 = 14,9$ МПа.

Среднее значение между меньшей и наибольшей «прочностями»: $f_{cm2, mod} = (14,1 + 14,9) / 2 = 14,5$ МПа.

На рисунке 5 представлена прямая $\sigma_1 / f_{cm2, mod} = 14,5 / 10,9 = 1,33$.

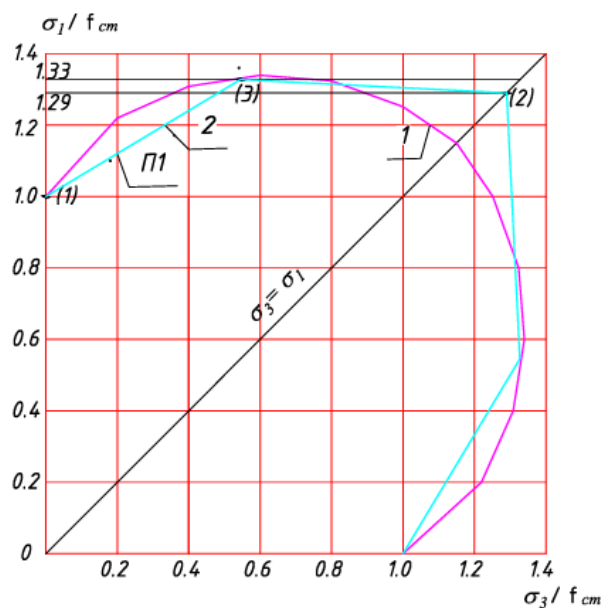
По п. 3. На рисунке 5 по результатам рассмотрения «неориентированного разрушения» с увеличенной прочностью узлов ($r_{i2} = r_i + \sigma_3 \cos \alpha_i$) по точкам при $\sigma_3 / f_{cm} = 0,18$; $\sigma_3 / f_{cm} = 0,36$ и $\sigma_3 / f_{cm} = 0,54$, проведена прямая (П. 1).

Точка пересечения П. 1 с прямой, соответствующей $\sigma_1 / f_{cm, mod} = 1,33$ обозначена как (3).

Соединяя точки (1), (3) и (2), получаем график зависимости прочности бетона для случая двухосного сжатия ($\sigma_1 / f_{cm, mod} - \sigma_3 / f_{cm, mod}$).

Графики по эмпирической зависимости, указанной в [9], представлены в кусочно-линейном виде на рисунке 5.

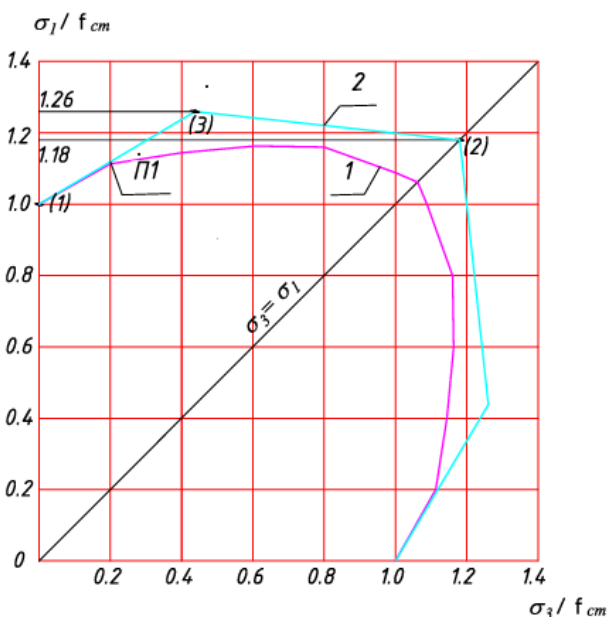
Аналогично выполнено построение графика для $f_{cm} = 50,0$ МПа – см. рисунок 6.



1) по эмпирическим зависимостям [9];

2) по результатам моделирования

Рисунок 5 – Изменение прочности бетона при двухосном сжатии в зависимости от соотношения главных напряжений для бетона $f_{cm} = 10,0$ МПа



1) по эмпирическим зависимостям [9];

2) по результатам моделирования

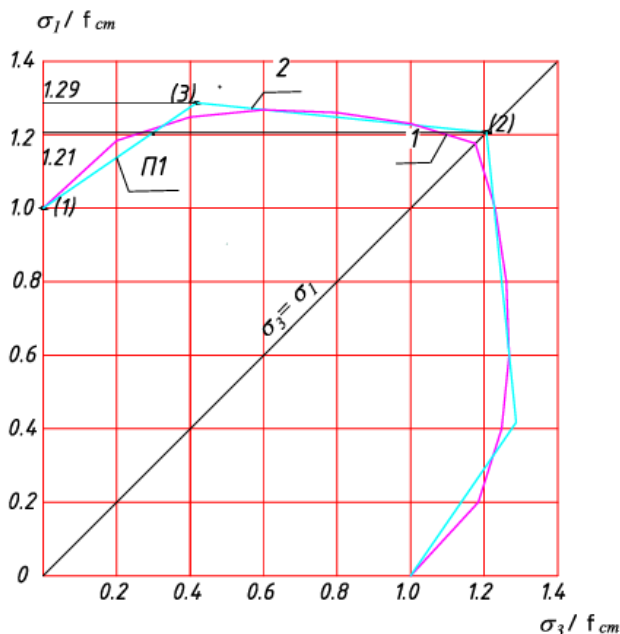
Рисунок 6 – Изменение прочности бетона при двухосном сжатии в зависимости от соотношения главных напряжений для бетона $f_{cm} = 50,0$ МПа

Обсуждение

Сравнение графиков $(\sigma_1/f_{cm, mod} - \sigma_3/f_{cm, mod})$, полученных в результате моделирования с экспериментальными данными, приведенными в [21] и Руководстве НИИЖБа, представлено на рисунках 7–9.

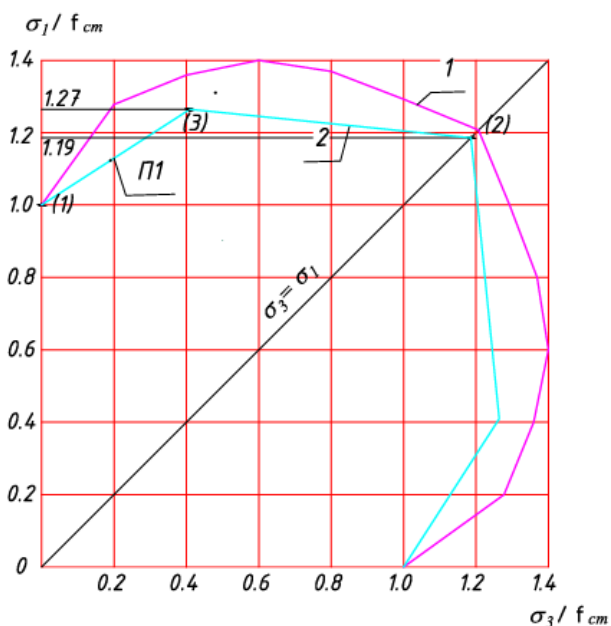
В [21] исследовался бетон нормального веса прочностью при осевом сжатии $f_{cm} = 31,0$ МПа. При моделировании использованы следующие характеристики нормального распределения: среднее значение $- f_{cm} = 31,0$ МПа; СКО $- D = (f_{cm} - R_T^0)/2 = 9,77$ МПа при значении нижнего параметрического уровня по [1] $- R_T^0 = 0,37 f_{cm}$.

Используя описанную выше методику, на рисунке 7 приведем результаты моделирования.



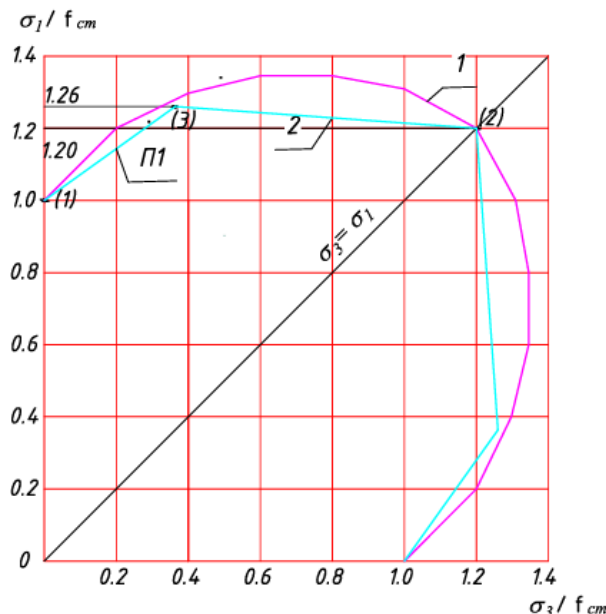
1) по данным, представленным в [21];
2) по результатам моделирования

Рисунок 7 – Изменение прочности бетона при двухосном сжатии в зависимости от соотношения главных напряжений для бетона $f_{cm} = 31,0$ МПа



1) по данным, представленным в Руководстве НИИЖБа;
2) по результатам моделирования

Рисунок 8 – Изменение прочности бетона при двухосном сжатии в зависимости от соотношения главных напряжений для бетона $f_{cm} = 30,3$ МПа



1) по данным, представленным в Руководстве НИИЖБа;
2) по результатам моделирования

Рисунок 9 – Изменение прочности бетона при двухосном сжатии в зависимости от соотношения главных напряжений для бетона $f_{cm} = 48,4$ МПа

Большой объем исследований прочности бетона представлен в Руководстве НИИЖБа. Там же даны рекомендации по методике проведения испытаний бетона в сложных напряженных состояниях, форме образцов и испытательному оборудованию, что должно было упростить анализ экспериментальных данных, получаемых другими исследователями при использовании указанной методики.

Моделирование выполнялось для бетонов нормального веса со средней прочностью бетонных кубов $f_{cm, cube} = 36,7$ МПа и $f_{cm, cube} = 58,7$ МПа (Руководство НИИЖБа).

Для моделирования принято:

– при средней прочности кубов $f_{cm, cube} = 36,7$ МПа; $f_{cm} = 30,3$ МПа; значение нижнего параметрического уровня: $R_T^0 = 0,368 f_{cm}$; $D = (f_{cm} - R_T^0)/2 = 9,58$ МПа;

– при средней прочности кубов $f_{cm, cube} = 58,7$ МПа; $f_{cm} = 48,4$ МПа; значение нижнего параметрического уровня: $R_T^0 = 0,44 f_{cm}$; $D = (f_{cm} - R_T^0)/2 = 13,56$ МПа.

Результаты представлены на рисунках 8 и 9.

Анализ результатов моделирования совместно с данными других авторов, позволяет сделать следующие **выводы**.

1. Представленная модель может быть использована для прогнозирования прочности бетона нормального веса в условиях двухосного сжатия. Положительные результаты получены также при использовании модели для двухосного растяжения и сжатия с растяжением [18, 19, 20].

2. Бетоны, с высокой прочностью при осевом сжатии (бетоны высокого класса по прочности) имеют меньший рост прочности в условиях двухосного сжатия, что совпадает с имеющимися экспериментальными данными.

3. Прочность при двухосном сжатии, как показывают результаты моделирования, определяется изменчивостью «прочности узлов» и направлением «разрушения». Но если при моделировании вариация «прочности узлов» составляет 5,0–7,0 %, то, учитывая неоднородность структуры, для экспериментальных образцов – 10,0 % и более. В этом случае будут наблюдаться значительные колебания прочности при двухосном сжатии, что существенно отразится на форме графиков, полученных по результатам экспериментов (см. рисунки 5, 6, 8, 9).

4. Результаты моделирования показывают, что при двухосном сжатии происходит устойчивый рост прочности бетонов нормального веса ($f_{cm2} > f_{cm}$), связанный с изменением характера разрушения. «Ориентация» разрушения строго в определенном направлении, «задействует» большее число элементов структуры, отвечающих

за прочностные показатели, что подтверждается и классической теорией протекания. Отсутствие увеличения прочности, например при $\sigma_1 = \sigma_2$, в условиях двухосного сжатия, приведенное в [2, 10], может быть связано с условиями проведения испытаний и формой образца. В этих исследованиях образцы имели форму пластин: $10 \times 10 \times 2$ и $10 \times 10 \times 5$ см – по [17]; $40 \times 40 \times 9,5$ см – по [2].

5. На результаты моделирования не влияют технологические и иные сторонние факторы, что происходит при проведении экспериментов.

6. Имея значения прочности бетона f_{cm} и нижней параметрической точки R_1^0 непосредственно из эксперимента, можно смоделировать поведение данного бетона в условиях двухосного сжатия, сжатия с растяжением и двухосного растяжения.

Список цитированных источников

- Берг, О. Я. Высокопрочный бетон / О. Я. Берг, Е. Н. Щербаков, Г. Н. Писанко. – М.: Стройиздат, 1971. – 196 с.
- Берг, О. Я. О прочности бетона при двухосном сжатии / О. Я. Берг, Н. В. Смирнов // Бетон и железобетон. – 1965. – № 11. – С. 37–39.
- Берг, О. Я. Физические основы прочности бетона и железобетона / О. Я. Берг. – М.: Госстройиздат, 1952. – 96 с.
- Бобров, В. В. Методы оценки влияния различных факторов на процесс микроразрушений бетона под нагрузкой: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.23.01 / Бобров Владимир Викторович; Моск. гос. строит. (МГСУ). – М., 2015. – 26 с.
- Гасратова, Н. А. Решение некоторых классических пространственных задач теории упругости в напряжениях / Н. А. Гасратова // Молодой ученый. – 2014. – № 3 (62). – С. 1–6.
- Гвоздев, А. А. Расчет несущей способности конструкций по методу предельного равновесия / А. А. Гвоздев. – М.: Стройиздат, 1949. – 280 с.
- Гениев, Г. А. Теория пластичности бетона и железобетона / Г. А. Гениев, В. Н. Киссюк, Г. А. Тюпин. – М.: Стройиздат, 1974. – 316 с.
- Зайцев, Ю. В. Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушения / Ю. В. Зайцев. – М.: Стройиздат, 1982. – 196 с.
- Карпенко, Н. И. К определению прочности бетона при трехосном сжатии / Н. И. Карпенко, С. Н. Карпенко // Жилищное строительство. – 2013. – № 7. – С. 27–28.
- Карпенко, Н. И. Общие модели механики железобетона / Н. И. Карпенко. – М.: Стройиздат, 1996. – 413 с.
- Современные критерии прочности для бетонов при объемных напряженных состояниях / В. И. Корсун, С. Н. Карпенко, С. Ю. Макаренко, А. В. Недорезов // Строительство и реконструкция. – 2021. – № 5 (97). – С. 16–30.
- Кудзис, А. П. О погрешностях двухосных испытаний бетона / А. П. Кудзис, А.-И. И. Ноткус // Бетон и железобетон. – 1978. – № 6. – С. 32–34.
- Лехницкий, С. Г. Теория упругости анизотропного тела / С. Г. Лехницкий. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1977. – 415 с.
- Маклакова, С. Н. Исследование прочности бетона при двухосном сжатии / С. Н. Маклакова, М. А. Галкина, В. Н. Бровкин // Вестник ТвГТУ. Строительство. Электротехника и химические технологии. – 2022. – № 1 (13). – С. 23–28.
- Истомин, А. Д. Зависимость границ микротрещинообразования бетона от его прочности и вида напряженного состояния / А. Д. Истомин, Н. А. Беликов // Вестник МГСУ. – 2011. – № 2. – С. 159–162.
- Тарасевич, Ю. Ю. Перколяция: Теория, приложения, алгоритмы / Ю. Ю. Тарасевич. – М.: Едиториал УРСС, 2002. – 112 с.
- Теличко, В. Г. Исследование прочности при двухосном сжатии бетона класса В25 / В. Г. Теличко, Л. А. Зиборов // Изв. ТулГУ. Технические науки. – 2009. – № 1–2. – С. 89–94.
- Цветков, С. В. Прочность тяжелого бетона при двухосном растяжении / С. В. Цветков, С. С. Цветков // Вестник гражданских инженеров. – 2023. – № 6 (101). – С. 43–49.
- Цветков, С. В. Прогнозирование прочности тяжелого бетона в условиях двухосного сжатия с растяжением по результатам моделирования / С. В. Цветков // Вестник гражданских инженеров. – 2021. – № 5 (88). – С. 57–62.
- Цветков, С. В. К вопросу прочности тяжелых бетонов в условиях сжатия-растяжения / С. В. Цветков, С. С. Цветков // Вестник гражданских инженеров. – 2025. – № 3 (110). – С. 51–58.
- Kupfer, H. B. Behavior of Concrete Under Biaxial Stresses / H. B. Kupfer, K. H. Gerstle // Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE. – 1973. – Vol. 99, No. EM 4. – S. 852–866.

References

- Berg, O. YA. Vysokoprochnyj beton / O. YA. Berg, E. N. SHCHerbakov, G. N. Pisanko. – M.: Strojizdat, 1971. – 196 s.
- Berg, O. YA. O prochnosti betona pri dvuhosnom szhatii / O. YA. Berg, N. V. Smimov // Beton i zhelezobeton. – 1965. – № 11. – S. 37–39.
- Berg, O. YA. Fizicheskie osnovy prochnosti betona i zhelezobetona / O. YA. Berg. – M.: Gosstrojizdat, 1952. – 96 s.
- Bobrov, V. V. Metody ocenki viiyaniya razlichnyh faktorov na process mikrorazrushenij betona pod nagruzkoy; avtoref. dis... kand. tekhn. nauk: 05.23.01 / Bobrov Vladimir Viktorovich; Mosk. gos. stroit. (MGSU). – M., 2015. – 26 s.
- Gasratova, N. A. Reshenie nekotoryh klassicheskikh prostranstvennyh zadach teorii uprugosti v napryazheniyah / N. A. Gasratova // Molodoy uchenyj. – 2014. – № 3 (62). – S. 1–6.
- Gvozdev, A. A. Raschet nesushchej sposobnosti konstrukcij po metodu predelnogo ravnovesiya / A. A. Gvozdev. – M.: Strojizdat, 1949. – 280 s.
- Geniev, G. A. Teoriya plastichnosti betona i zhelezobetona / G. A. Geniev, V. N. Kisyuk, G. A. Tyupin. – M.: Strojizdat, 1974. – 316 s.
- Zajcev, YU. V. Modelirovanie deformacij i prochnosti betona metodami mekhaniki razrusheniya / YU. V. Zajcev. – M.: Strojizdat, 1982. – 196 s.
- Karpenko, N. I. K opredeleniyu prochnosti betona pri trekhosnom szhatii / N. I. Karpenko, S. N. Karpenko // Zhilishchnoe stroitel'stvo. – 2013. – № 7. – S. 27–28.
- Karpenko, N. I. Obshchie modeli mekhaniki zhelezobetona / N. I. Karpenko. – M.: Strojizdat, 1996. – 413 s.
- Sovremennye kriterii prochnosti dlya betonov pri ob'emnyh napryazhennyh sostoyaniyah / V. I. Korsun, S. N. Karpenko, S. YU. Makarenko, A. V. Nedorezov // Stroitel'stvo i rekonstrukciya. – 2021. – № 5 (97). – S. 16–30.
- Kudzis, A. P. O pogreshnostyah dvuhosnyh ispytaniy betona / A. P. Kudzis, A.-I. I. Notkus // Beton i zhelezobeton. – 1978. – № 6. – S. 32–34.
- Lekhnickij, S. G. Teoriya uprugosti anizotropnogo tela / S. G. Lekhnickij. – M.: Nauka, Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoy literatury, 1977. – 415 s.
- Maklakova, S. N. Issledovanie prochnosti betona pri dvuhosnom szhatii / S. N. Maklakova, M. A. Galkina, V. N. Brovkin // Vestnik TvGTU. Stroitel'stvo. Elektrotehnika i himicheskie tekhnologii. – 2022. – № 1 (13). – S. 23–28.
- Istomin, A. D. Zavisimost' granic mikrotreshchinoobrazovaniya betona ot ego prochnosti i vida napryazhennogo sostoyaniya / A. D. Istomin, N. A. Belikov // Vestnik MGSU. – 2011. – № 2. – S. 159–162.
- Tarasevich, YU. YU. Perkolyaciya: Teoriya, prilozheniya, algoritmy / YU. YU. Tarasevich. – M.: Editorial URSS, 2002. – 112 s.
- Telichko, V. G. Issledovanie prochnosti pri dvuhosnom szhatii betona klassa V25 / V. G. Telichko, L. A. Ziborov // Izv. TulGU. Tekhnicheskie nauki. – 2009. – № 1–2. – S. 89–94.
- Cvetkov, S. V. Prochnost' tyazhelogo betona pri dvuhosnom rastyazhenii / S. V. Cvetkov, S. S. Cvetkov // Vestnik grazhdanskih inzhenerov. – 2023. – № 6 (101). – S. 43–49.
- Cvetkov, S. V. Prognozirovanie prochnosti tyazhelogo betona v usloviyah dvuhosnogo szhatiya s rastyazheniem po rezul'tatam modelirovaniya / S. V. Cvetkov // Vestnik grazhdanskih inzhenerov. – 2021. – № 5 (88). – S. 57–62.
- Cvetkov, S. V. K voprosu prochnosti tyazhelyh betonov v usloviyah szhatiya-rastyazheniya / S. V. Cvetkov, S. S. Cvetkov // Vestnik grazhdanskih inzhenerov. – 2025. – № 3 (110). – S. 51–58.
- Kupfer, H. B. Behavior of Concrete Under Biaxial Stresses / H. B. Kupfer, K. H. Gerstle // Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE. – 1973. – Vol. 99, No. EM 4. – S. 852–866.

Материал поступил 21.08.2025, одобрен 11.11.2025, принят к публикации 17.11.2025