

УДК 624.012.4-183.2

© С. В. Цветков, канд. техн. наук, гл. конструктор
(ЗАО «Управление специальных
строительных работ»,

Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: vasilieva4@yandex.ru

© С. С. Цветков, студент

(Санкт-Петербургский государственный
университет промышленных технологий и дизайна,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: tswetkov.svyatoslav@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2025-22-3-51-59

© S. V. Tsvetkov, PhD in Sci. Tech., Chief Designer
(CJSC «Management of Special

Construction Work»,

St. Petersburg, Russia)

E-mail: vasilieva4@yandex.ru

© S. S. Tsvetkov, student

(Saint Petersburg State University of Industrial
Technologies and Design,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: tswetkov.svyatoslav@yandex.ru

К ВОПРОСУ ПРОЧНОСТИ ТЯЖЕЛЫХ БЕТОНОВ В УСЛОВИЯХ СЖАТИЯ–РАСТЯЖЕНИЯ

ON THE ISSUE OF THE STRENGTH OF HEAVY CONCRETES UNDER COMPRESSION–TENSION CONDITIONS

Изменение прочности бетона в условиях сжатия–растяжения учитывается при расчетах бетонных элементов на прочность и железобетонных — на трещиностойкость. Исследования поведения бетона в напряженных состояниях, связанных с воздействиями усилий противоположного знака, носят в основном экспериментальный характер и связаны со многими сложностями с учетом различного сопротивления бетона при сжатии и растяжении, а на получаемые зависимости могут оказывать влияние как условия проведения испытаний, так и методика. Иными словами, критерии прочности бетона в таком напряженном состоянии являются преимущественно феноменологическими. Приведены данные по прочности тяжелого бетона в условиях совместного действия сжатия и растяжения, полученные по результатам моделирования, и выполнено их сравнение с экспериментальными данными других исследователей.

Ключевые слова: напряженное состояние, сжатие–растяжение, прочность бетона, уровень нагружения, нижняя параметрическая точка, класс бетона.

The change in concrete strength under compression–tension conditions is taken into account when calculating concrete elements for strength and reinforced concrete elements for crack resistance. Studies of the behavior of concrete under stress conditions associated with the effects of forces of the opposite sign are mainly experimental in nature and are associated with many problems, given the different resistance of concrete under compression and tension. The resulting dependencies can be influenced by both the test conditions and the methodology. In other words, the criteria for the strength of concrete in such a stressed state are mainly phenomenological. The data on the strength of heavy concrete under conditions of joint action of compression and tension obtained by modeling results are presented and compared with the experimental data of other researchers.

Keywords: stress state, compression–tension, concrete strength, loading level, lower parametric point, class of concrete.

Введение

В реальных условиях бетонные и железобетонные конструкции сооружений различного назначения испытывают сложные напряженные состояния, что требует учета при разработке нормативных документов по расчету конструкций. Получение исходных данных по механическим характеристикам бетона

в сложных напряженных состояниях только экспериментальным путем связано со значительными трудностями [9]. Следовательно, для оценки экспериментальных данных в условиях неодноосных напряженных состояний необходимо иметь определенные теоретические предпосылки, позволяющие оценивать достоверность получаемых результатов.

К такому напряженному состоянию следует отнести также двухосное напряженное состояние «сжатие–растяжение», особенно с учетом наличия растягивающих напряжений, усложняющих проведение экспериментальных исследований.

В действующих и ранее используемых нормативных документах учет «сжатия–растяжения» нашел свое отражение при выполнении расчетов железобетонных элементов на образование трещин, наклонных к продольной оси, а также прочности бетонных элементов.

В СНиП 2.03.01–84 «Бетонные и железобетонные конструкции» представлена методика расчета по образованию трещин, наклонных к продольной оси.

Расчет по образованию трещин производится из условия

$$\sigma_{mt} \leq \gamma_{b4} R_{bt,ser}, \quad (1)$$

где γ_{b4} — коэффициент условий работы бетона, учитывающий наличие «сжатия–растяжения»:

$$\gamma_{b4} = (1 - \sigma_{mc}/R_{bc,ser}) / (0,2 + \alpha B) \leq 1,0; \quad (2)$$

σ_{mc} , σ_{mt} — главные напряжения, определяемые по значениям нормальных и касательных напряжений как для упругого тела.

Представленная в знаменателе зависимости (2) величина $(0,2 + \alpha B)$ определяется классом бетона по прочности и его видом.

Из анализа зависимостей (1) и (2) несложно получить (при $(0,2 + \alpha B) = 1,0$)

$$\sigma_{mt} / R_{bt,ser} = (1 - \sigma_{mc} / R_{bc,ser}),$$

откуда

$$\sigma_{mt} / R_{bt,ser} + |\sigma_{mc}| / R_{bc,ser} = 1,0. \quad (3)$$

Аналогичная зависимость представлена в СП 41.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений», где для учета влияния плоского напряженного состояния при действии напряжений разного знака при расчете прочности бетонных элементов применяется коэффициент γ_{b5} :

- при проверке прочности сжатого бетона

$$\gamma_{b5} = [1 + (\sigma_1 / |\sigma_3|)(R_b / R_{bt})]^{-1}; \quad (4)$$

- при проверке прочности растянутого бетона

$$\gamma_{b5} = [1 + (|\sigma_3| / \sigma_1)(R_{bt} / R_b)]^{-1}. \quad (5)$$

Зависимость, например, (4) может быть преобразована:

$$\gamma_{b5} = |\sigma_3| / R_b = [1 + (\sigma_1 / |\sigma_3|)(R_b / R_{bt})]^{-1};$$

$$|\sigma_3| / R_b = 1 / [R_b / R_b + (\sigma_1 / |\sigma_3|)(R_b / R_{bt})],$$

после упрощения получим

$$|\sigma_3| / R_b + \sigma_1 / R_{bt} = 1, \quad (6)$$

что аналогично (3).

Экспериментальные зависимости по изменению прочности бетона в условиях двухосного сжатия–растяжения представлены в Рекомендациях по определению прочностных и деформативных характеристик бетона при одноосных напряженных состояниях (далее — Рекомендации НИИЖБ)¹, при этом они существенно отличаются от линейных зависимостей (3) и (6). В Рекомендациях НИИЖБ испытания проводились на образцах-кубах 150×150 мм, нагружение простое пропорциональное, ступенями, с выдержкой 4–5 мин.

В качестве одного из феноменологических критериев прочности бетона в условиях «сжатия–растяжения» можно рассмотреть результаты, представленные в [7], где при $\sigma_1 \geq 0$ (растяжение), $\sigma_2 = 0$ и $\sigma_3 \leq 0$ (сжатие) условие прочности имеет вид:

$$(\sigma_1 / R_{bt})^2 + [(1 - 2c)(\sigma_3 / R_b)^2 / 1 - 2c(\sigma_3 / R_b)^2] \leq 1, \quad (7)$$

где $c = 0,2 - (B - B30) / B$; B — класс бетона, принимается $B \geq 30$.

Сравнение экспериментальных данных, приведенных в Рекомендациях НИИЖБ для крупнозернистого бетона с кубиковой прочностью $R = 35,5$ МПа ($B \approx 25$), с зависимостью (7) при В30 и рекомендациями СНиП 2.03.01–84 «Бетонные и железобетонные конструкции» представлено на рис. 1.

Как видно из результатов, отличие может составлять более 40 % при практически одинаковом классе бетона.

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

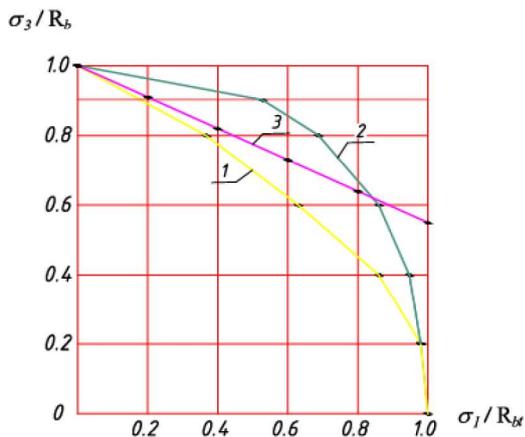


Рис. 1. График изменения прочности тяжелого бетона при «сжатии–растяжении»: 1 — экспериментальные данные из Рекомендаций НИИЖБ (для бетона с кубиковой прочностью $R = 35,5$ МПа, класс В25); 2 — по критерию (7) (для бетона класса В30); 3 — по зависимости (1), (2) для тяжелого бетона класса В25

Методы

Для моделирования поведения бетона в условиях сжатия–растяжения была использована модель, приведенная в [10–12].

В основу расчетной модели положена доработанная модель, описанная в теории перколяции (теория протекания, или теория просачивания) — математической теории, применяемой в физике и химии для анализа и изучения процессов, происходящих в неоднородных средах, характеристики которых являются случайными величинами.

Так, для исследования электропроводности смесей задается квадратная решетка, каждый узел которой не является электропроводящим. Общее количество узлов в решетке — N_0 . Случайным образом узлам последовательно назначаются электропроводящие свойства. Тогда при определенном количестве электропроводных узлов $N_{уз}$ решетка становится «электропроводной» — появляется цепочка узлов, пересекающих исходную решетку. Количество узлов, при котором происходит изменение свойств решетки, называется пороговым. Отношение $N_{уз}/N_0$ также характеризует пороговый переход.

В исходную модель теории протекания были внесены следующие дополнения:

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

Для принятой модели каждому узлу присваивалось случайное числовое значение «прочности». «Прочности» узлов являются случайными независимыми числовыми значениями, распределенными по нормальному закону распределения случайных величин.

Следующей задачей было определить характеристики для нормального распределения прочности узлов — задать среднее значение (математическое ожидание) и среднее квадратическое отклонение (СКО):

- Прочность бетона на осевое сжатие (R_b) принимается за среднее значение (математическое ожидание) нормального распределения случайных величин значений прочности узлов.

- Для определения среднего квадратического отклонения можно воспользоваться правилом 3σ (трех сигм). Так, в пределах двух среднеквадратических отклонений лежит 95,44 % всех значений нормально распределенной случайной величины.

- Как отмечается в работе [3], поведение бетона до достижения границы R_T^0 (нижняя параметрическая точка) характеризуется отсутствием нарушений структуры (трещин возле пор, трещин по контактной зоне) с обеспеченностью не менее 95,0 %.

Нижняя параметрическая точка отмечена в [1] как значение минимальных напряжений $\sigma_{c,min}$, при котором начинается нарушение структуры бетона (развитие микротрещин), характеризуемое увеличением времени прохождения ультразвука через образец, уменьшением величин модуля деформации и увеличением объема образца.

Учитывая, что в диапазоне 2σ находится 95,44 % всех значений случайной величины, среднее квадратическое отклонение можно определить как $\sigma = (R_b - R_T^0)/2$. Далее, чтобы

не путать напряжения с СКО, последнее будет обозначено как D .

Значения R_b и R_T^0 для моделирования осевого сжатия могут определяться по результатам испытаний бетона или известным зависимостям.

Таким образом, в узлы решетки помещались значения «прочности», взятые из диапазона 95,44 % всех значений нормально распределенной случайной величины, т. е. от R_T^0 до $(2R_b - R_T^0)$.

2. По теории протекания случайным образом менялись исходные свойства узлов — одни из них удовлетворяли условию электропроводности, а другие — нет. Постепенно, меняя свойства узлов, решетка переходит из одного состояния в другое.

В нашем случае поэтапно задавалась фиксированная «внешняя нагрузка», меняющая состояние узла — неразрушенный или разрушенный. Если «нагрузка» превышала «прочность» узла, он считался разрушенным.

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

Для реализации модели была написана программа. Окно программы приведено на рис. 2, а: в качестве примера задана решетка размером 10×10 ячеек, математическое ожидание (среднее значение) $R_b = 16,2$ МПа; среднее квадратическое отклонение (СКО) $D = 5,83$ МПа; текущий уровень «нагрузки» $\sigma_{c,i} = 10,5$ МПа; шаг «нагружения» — $0,5$ МПа; при заданном уровне «нагрузки» количество разрушенных узлов (вершин) — 17 штук.

Порядок построения модели для осевого сжатия:

1. Прочность элементов структуры r_i распределена по нормальному закону со следующими характеристиками: математическое ожидание $M = R_b$, среднее квадратическое отклонение $D = (R_b - \sigma_{c,\min})/2 = (R_b - R_T^0)/2$. Определение параметрических точек выполнялось в соответствии с рекомендациями [1]

для осевого сжатия. Для обычных тяжелых бетонов определение по зависимости, представленной в [1], дает несколько заниженные значения, что не является критичным. Это в целом совпадает с более поздними работами других исследователей [2, 5].

Призмная прочность бетонов R_b определялась в соответствии с Рекомендациями НИИЖБ.

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

3. При $\sigma_{c,i} > r_i$ узел считается разрушенным. Для каждого значения $\sigma_{c,i}$ производился подсчет количества разрушенных узлов N_i . Пример реализации одной из решеток представлен на рис. 2, б: при уровне напряжений $\sigma_c/R_b = 10,0/16,2 = 0,61$ количество разрушенных узлов составляет $N_i = 16$ штук.

4. Разрушенные узлы, расположенные рядом друг с другом, образуют цепочку. Когда такая цепочка пересекает всю решетку, это считается разрушением, после чего производится подсчет общего количества разрушенных узлов N_{\max} . На рис. 2, в количество разрушенных узлов при пересечении цепочкой исходной решетки (разрушении) составило $N_{\max} = 60$ штук («пороговое значение»).

Напряжения, соответствующие началу нарушения структуры бетона, при растяжении не определяются, но можно предположить, что

$$\sigma_{t,\min}/R_{bt} = \sigma_{c,\min}/R_b = R_T^0/R_b.$$

Поэтому аналогичная модель использована и для случая осевого растяжения.

При моделировании были использованы бетоны со следующими характеристиками:

- тяжелый бетон М200 (В15), призмная прочность $R_b = 16,2$ МПа; значение нижнего параметрического уровня по [1] $R_T^0 = 0,28R_b$; $D = (R_b - R_T^0)/2 = 5,83$ МПа;

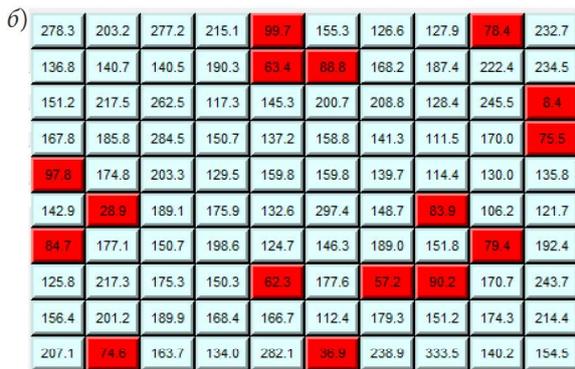
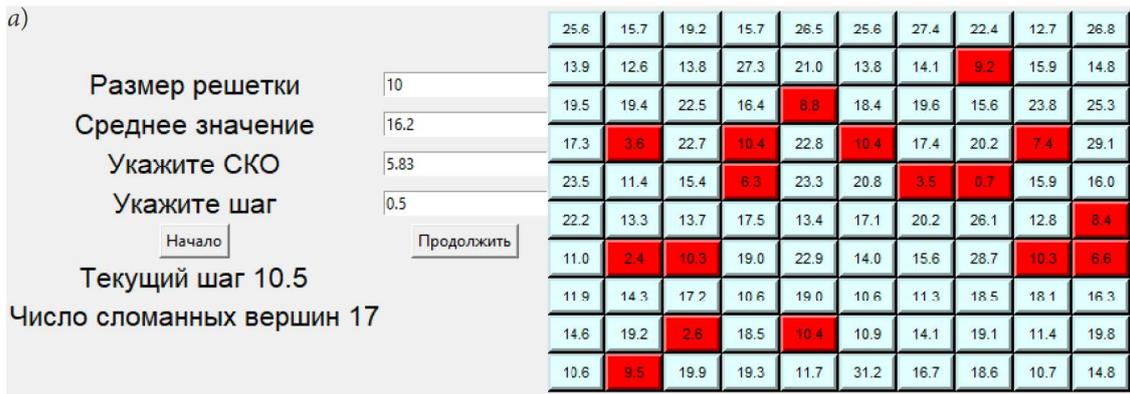


Рис. 2. Решетка 10×10: а — окно программы; б — призмная прочность $R_b = 16,2$ МПа, уровень нагрузки $\sigma_c/R_b = 10,0/16,2 = 0,61$, число разрушенных узлов $N_i = 16$, $N_i/N_{max} = 0,27$; в — призмная прочность $R_b = 16,2$ МПа, уровень нагрузки $\sigma_c/R_b = 1,0$, число разрушенных узлов $N_{max} = 60$

• тяжелый бетон М400 (В30), призмная прочность $R_b = 32,4$ МПа; значение нижнего параметрического уровня $R_T^0 = 0,39R_b$; $D = (R_b - R_T^0)/2 = 9,88$ МПа.

Призмная прочность и прочность бетонов при растяжении определялись по Рекомендациям НИИЖБ:

$$R_{bt} = 5R/(45 + R), \quad (8)$$

где R — прочность кубов при испытаниях на одноосное сжатие в МПа, тогда

- для $R_b = 16,2$ МПа; $R = 19,6$ МПа; $R_{bt} = 1,32$ МПа;
- для $R_b = 32,4$ МПа; $R = 39,3$ МПа; $R_{bt} = 2,09$ МПа.

По результатам рассмотрения модели разрушения, описанной в [3], при растяжении первые микротрещины (для обычных бетонов) появляются на границе «матрица-заполнитель», далее выходят в матрицу и имеют отрывной характер.

При сжатии трещина, выходящая в матрицу, тоже носит отрывной характер, несмотря на то что ее развитие по контактной зоне происходит по сдвиговому механизму.

Таким образом, в условиях плоского напряженного состояния растяжения со сжатием после растяжения трещины отрыва продолжают свой рост и при сжатии. При сжатии с растяжением — аналогично.

Данное утверждение подтверждается схемами разрушения (схема 1), приведенными в [6], и позволяет при моделировании учитывать разрушенные узлы при первоначальном сжатии (при растяжении), в последующем растяжении (сжатии).

Результаты моделирования

Работа с моделью. Рассмотрим тяжелый бетон, у которого $R_b = 16,2$ МПа; $R_T^0 = 0,28R_b = 4,5$ МПа; $R_{bt} = 1,32$ МПа. В качестве исход-

ной принята решетка размером 20×20 узлов. Среднее количество узлов, соответствующее пороговому значению из рассмотренных 30 решеток, составляет $N_{m,max} = 242$.

При моделировании каждому уровню нагружения соответствует свое количество разрушенных узлов — N_i . Если испытано n решеток, то среднее количество разрушенных узлов, соответствующих данному уровню нагружения, определится как

$$N_{m,i} = \sum N_i / n. \quad (9)$$

Среднее пороговое значение

$$N_{m,max} = \sum N_{max i} / n. \quad (10)$$

Коэффициент снижения прочности при последующем воздействии можно представить как

$$K = \sigma_t / R_{bt} = (1 - N_{m,i} / N_{m,max}) \quad (11)$$

или

$$\sigma_t = R_{bt} k = R_{bt} (1 - N_{m,i} / N_{m,max}), \quad (11a)$$

где $N_{m,i}$ — среднее количество разрушенных узлов всех решеток при данном уровне сжимающей нагрузки; $N_{m,max}$ — среднее пороговое количество разрушенных узлов по всем решеткам при сжатии.

После приложения сжимающей нагрузки для уровня напряжений $\sigma_c = 0,43R_b$ среднее количество разрушенных узлов составит $N_{m,i} = 39$ штук, тогда по (11) $k = \sigma_t / R_{bt} = (1 - N_{m,i} / N_{m,max}) = (1 - 39/242) = (1 - 0,16) = 0,84$.

Соответственно, разрушение при последующем приложении растягивающей нагрузки произойдет при напряжениях $\sigma_t = kR_{bt} = 0,84 \cdot 1,32 = 1,11$ МПа — см. зависимость (11a).

Рассматривая следующие решетки, далее получим:

- при $\sigma_c = 0,625R_b$: $N_{m,i} = 86$; $k = 0,64$; $\sigma_t = 0,84$ МПа;
- при $\sigma_c = 0,813R_b$: $N_{m,i} = 147$; $k = 0,40$; $\sigma_t = 0,53$ МПа.

Результат моделирования представлен на рис. 3 (график 1).

Аналогично произведен расчет для случая приложения растягивающей нагрузки с последующим сжатием (см. рис. 3, график 2):

$\sigma_c = R_b k = R_b (1 - N_{m,i} / N_{m,max})$, (11б)
 где $N_{m,i}$ — среднее количество разрушенных узлов всех решеток при данном уровне растягивающей нагрузки; $N_{m,max}$ — среднее пороговое количество разрушенных узлов по всем решеткам при растяжении.

По точкам графиков 1 и 2, соответствующим минимальным значениям прочности, построен график 3 для прочности бетона при совместном действии сжатия–растяжения.

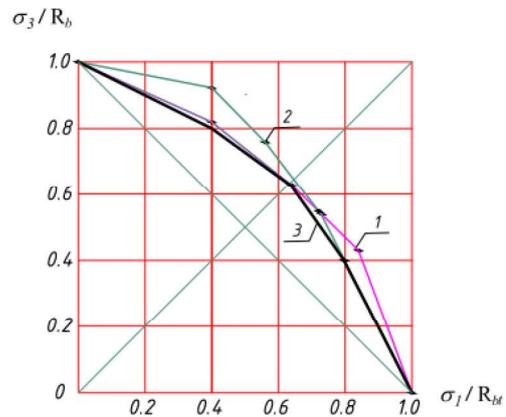


Рис. 3. График изменения прочности тяжелого бетона ($R_b = 16,2$ МПа) при «сжатии–растяжении»: 1 — результаты моделирования для сжатия с последующим растяжением; 2 — результаты моделирования для растяжения с последующим сжатием; 3 — оггибающая по минимальным значениям графиков 1 и 2

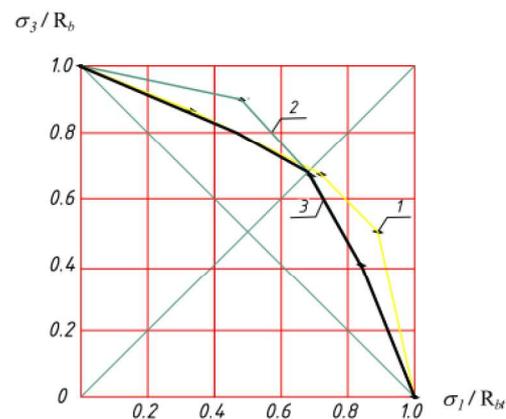


Рис. 4. График изменения прочности тяжелого бетона ($R_b = 32,4$ МПа) при «сжатии–растяжении»: 1 — результаты моделирования для сжатия с последующим растяжением; 2 — результаты моделирования для растяжения с последующим сжатием; 3 — оггибающая по минимальным значениям графиков 1 и 2

На рис. 4 приведены результаты моделирования для тяжелого бетона $R_b = 32,4$ МПа; $R_T^0 = 0,38R_b = 12,3$ МПа; $R_{bt} = 2,64$ МПа.

Результаты моделирования не являются новым критерием прочности тяжелого бетона. Вместе с тем получение данных о прочности бетона в условиях «сжатия–растяжения» по результатам испытания бетонов при осевом нагружении может быть полезным на практике, например, для определения исходных параметров в известных критериях прочности бетона, получаемых в настоящее время по результатам экспериментов [8].

Можно также рассмотреть вопрос о нормирования прочности бетона при сжатии–растяжении с учетом его класса.

На рис. 5 даны рекомендации по нормированию прочности тяжелых бетонов:

- для бетонов классов не выше В25 следует использовать линейную зависимость, аналогичную (б);
- для бетонов класса В25 и выше — кусочно-линейную функцию (рис. 5, график 1).

Обсуждение

Полученные результаты моделирования не противоречат имеющимся экспериментальным данным.

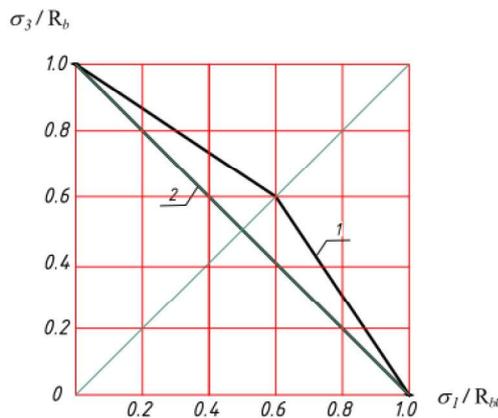


Рис. 5. Рекомендации по нормированию прочности тяжелого бетона при «сжатии–растяжении»: 1 — зависимость для бетона класса $V \geq 25$ при совместном действии сжимающих и растягивающих напряжений; 2 — зависимость для бетона класса $V < 25$ при совместном действии сжимающих и растягивающих напряжений

При значительной разнице прочности бетона на сжатие и растяжение в условиях проведения испытаний на «сжатие–растяжение» наиболее просто контролируется уровень сжимающих напряжений. Поэтому сначала образец нагружается сжимающей нагрузкой

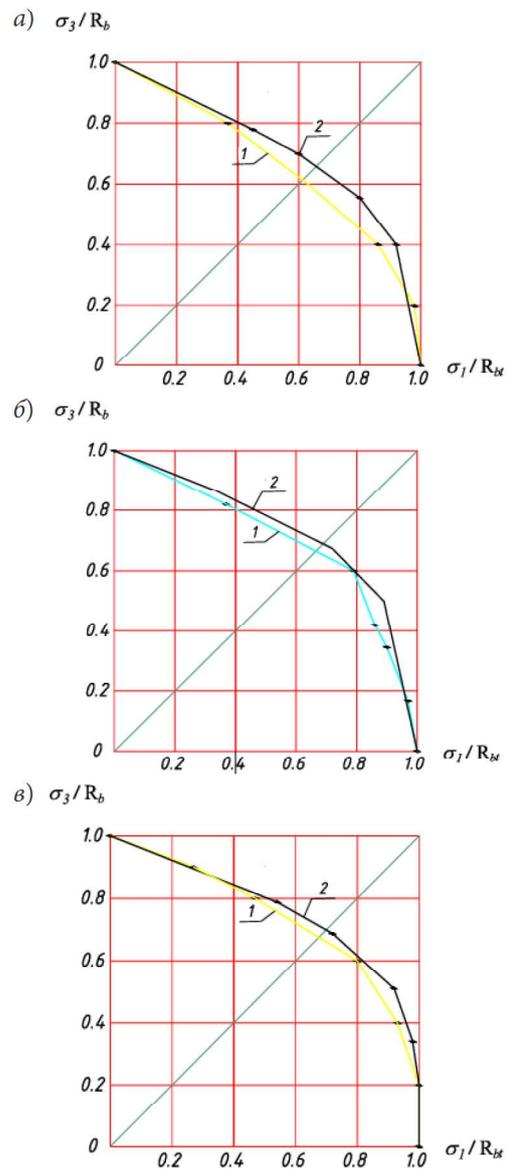


Рис. 6. График изменения прочности тяжелого бетона при «сжатии–растяжении»: 1 — изменение прочности тяжелого бетона для случая сжатия с последующим растяжением; 2 — изменение прочности тяжелого бетона по результатам моделирования для сжатия с последующим растяжением: а — класс бетона В25 ($R_b = 22,6$ МПа), Рекомендации НИИЖБ; б — класс бетона В30 ($R_b = 32,4$ МПа), по данным [4]; в — класс бетона В50 ($R_b = 53,3$ МПа), Рекомендации НИИЖБ

в одном направлении, после чего при постоянной величине сжимающих напряжений образец доводят до разрушения растягивающей нагрузкой в другом направлении. Этот факт влияет на форму графика зависимости « $\sigma_1/R_{bt} - \sigma_3/R_b$ » — см. данные рис. 6, где выполнено сравнение результатов моделирования для сжатия с последующим растяжением с данными экспериментов, приведенных в работе [4] и Рекомендациях НИИЖБ. Поэтому и было принято решение моделировать два случая приложения нагрузки: «сжатие–растяжение» и «растяжение–сжатие», после чего рассматривать их совместно (см. рис. 3 и 4, графики 3).

Параметр R_t^0 зависит от структуры бетона и фактически может различаться даже для одних и тех же значений R_b . Возможно, что определять нижнюю параметрическую точку целесообразно в каждом случае проведения испытаний по одноосному сжатию, что позволит набрать статистику для ее последующего использования.

Выводы

1. Для определения прочности бетона в плоском напряженном состоянии «сжатие–растяжение» достаточно иметь данные по одноосным испытаниям.

2. Зависимости (3), (6) могут использоваться только для бетонов, класс которых не превышает В25 (см. график 2, рис. 5).

3. Для бетонов класса В25 и выше учитывать изменение прочности в условиях «сжатия–растяжения» следует в соответствии с кусочно-линейным графиком 1, рис. 5.

4. Результаты моделирования могут быть использованы для определения эмпирических коэффициентов в известных критериях прочности тяжелых бетонов.

5. Представленная модель может рассматриваться также для определения прочности тяжелого бетона в условиях двухосного растяжения, двухосного сжатия и двухосного сжатия с растяжением [10–12].

Библиографический список

1. Берг О. Я., Щербаков Е. Н., Писанко Г. Н. Высокопрочный бетон. М.: Стройиздат, 1971. 208 с.
2. Бобров В. В. Методы оценки влияния различных факторов на процесс микроразрушений бетона под нагрузкой: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2015. 26 с.
3. Зайцев Ю. В. Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушения. М.: Стройиздат, 1982. 196 с.
4. Зиборов Л. А., Теличко В. Г. Исследование прочности при сжатии с растяжением бетона В-30 // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: сб. науч. тр. 9-й Междунар. конф. по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики. В 2 т. / под общ. ред. А. Б. Копылова, И. А. Басалай. Минск: БНТУ, 2013. Т. 2. С. 339–343.
5. Истомин А. Д., Беликов Н. А. Зависимость границ микротрещинообразования бетона от его прочности и вида напряженного состояния // Вестник МГСУ. 2011. № 2. С. 159–162.
6. Карпенко Н. И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 413 с.
7. Карпенко Н. И., Карпенко С. Н., Ухатский М. Л. К определению прочности бетона при трехосном растяжении и смешанных напряженных состояниях сжатие–растяжение // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 31-2 (50). С. 358–361.
8. Корсун В. И., Карпенко С. Н., Макаренко С. Ю., Недорезов А. В. Современные критерии прочности для бетонов при объемных напряженных состояниях // Строительство и реконструкция. 2021. № 5 (97). С. 16–30.
9. Кудзис А. П., Ноткус А.-И. И. О погрешностях двухосных испытаний бетона // Бетон и железобетон. 1978. № 6. С. 32–34.
10. Цветков С. В. Прочность тяжелого бетона при двухосном растяжении // Вестник гражданских инженеров. 2023. № 6 (101). С. 43–49.
11. Цветков С. В., Цветков С. С. К вопросу нормирования прочности тяжелых бетонов в условиях двухосного сжатия // Технология бетона. 2024. № 4 (195). С. 51–54.
12. Цветков С. В. Прогнозирование прочности тяжелого бетона в условиях двухосного сжатия с растяжением по результатам моделирования // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 5 (88). С. 57–62.

References

1. Berg O. Ya., Shcherbakov E. N., Pisanko G. N. *Vysokoprochniy beton* [High-strength concrete]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1971, 208 p.

2. Bobrov V. V. *Metody otsenki vliyaniya razlichnykh faktorov na protsess mikrorazrusheniya betona pod nagruzkoy. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk* [Methods of estimation of influence of various factors on the process of concrete micro-destruction under load. Author's thesis of Author's thesis of Phd in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 2015, 26 p.

3. Zaytsev Yu. V. *Modelirovanie deformatsiy i prochnosti betona metodami mekhaniki razrusheniya* [Modeling of deformations and strength of concrete by methods of fracture mechanics]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1982, 196 p.

4. Ziborov L. A., Telichko V. G. *Issledovanie prochnosti pri szhatii s rastyazheniem betona V-30* [Investigation of compressive strength with tensile strength of concrete B-30]. *Sotsial'no-ekonomicheskie i ekologicheskie problemy gornoy promyshlennosti, stroitel'stva i energetiki: sb. nauch. tr. 9-y Mezhdunar.konf. po problemam gornoy promyshlennosti, stroitel'stva i energetiki* [Socio-economic and ecological problems of mining industry, construction and energy: a collection of scientific articles of the 9-th International Conf. on problems of mining industry, construction and energy]. In 2 vols. Ed. by A. B. Kopylov, I. A. Basalay. Minsk, BNTU Publ., 2013, vol. 2, pp. 339–343.

5. Istomin A. D., Belikov N. A. *Zavisimost' granits mikrotreshchinoobrazovaniya betona ot ego prochnosti i vida napryazhyonogo sostoyaniya* [Dependence of concrete microcracking boundaries on its strength and type of stress state]. *Vestnik MGSU – Bulletin of MSCU*, 2011, no. 2, pp. 159–162.

6. Karpenko N. I. *Obshchie modeli mekhaniki zhelezobetona* [General models of mechanics of reinforced concrete]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1996, 413 p.

7. Karpenko N. I., Karpenko S. N., Ukhatskiy M. L. *K opredeleniyu prochnosti betona pri trekhosnom*

rastyazhenii i smeshannykh napryazhennykh sostoyaniyakh szhatie-rastyazhenie [Determination of concrete strength under triaxial tension and mixed compression-tension states]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering*, 2013, no. 31–2 (50), pp. 358–361.

8. Korsun V. I., Karpenko S. N., Makarenko S. Yu., Nedorezov A. V. *Sovremennye kriterii prochnosti dlya betonov pri ob'emnykh napryazhennykh sostoyaniyakh* [Modern strength criteria for concrete under volumetric stress states]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya – Construction and Reconstruction*, 2021, no. 5 (97), pp. 16–30.

9. Kudzis A. P., Notkus A.-I. I. *O pogreshnostyakh dvukhosnykh ispytaniy betona* [On the errors of biaxial tests of concrete]. *Beton i zhelezobeton – Concrete and Reinforced Concrete*, 1978, no. 6, pp. 32–34.

10. Tsvetkov S. V. *Prochnost' tyazhelogo betona pri dvukhosnom rastyazhenii* [Strength of heavy concrete under biaxial tension]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2023, no. 6 (101), pp. 43–49.

11. Tsvetkov S. V., Tsvetkov S. S. *K voprosu normirovaniya prochnosti tyazhelykh betonov v usloviyakh dvukhosnogo szhatiya* [To the issue of rationing of strength of heavy concretes under biaxial compression]. *Tekhnologiya betona – Technology of Concrete*, 2024, no. 4 (195), pp. 51–54.

12. Tsvetkov S. V. *Prognozirovanie prochnosti tyazhelogo betona v usloviyakh dvukhosnogo szhatiya s rastyazheniem po rezul'tatam modelirovaniya* [Forecasting of strength of heavy concrete under biaxial compression with tension based on modeling results]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2021, no. 5 (88), pp. 57–62.