ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СИЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ

DETERMINATION OF HEAVY CONCRETE STRENGTH AT VARIOUS FORCES ACTION IN ACCORDANCE WITH THE MODELING RESULTS

Приводятся данные по результатам моделирования прочностных свойств бетона при двухосном, трехосном сжатии и кратковременном динамическом нагружении. Модель разработана по результатам одноосных испытаний бетона сжимающей нагрузкой. Элементы структуры моделируются случайными величинами, распределенными по нормальному закону распределения. Выполнено сравнение результатов моделирования с известными теоретическими и экспериментальными данными.

Ключевые слова: двухосное сжатие, трехосное сжатие, напряжение сжатия, кратковременное динамическое воздействие, случайная величина, элементы структуры.

The paper presents data on the results of modeling the strength properties of concrete under biaxial compression, triaxial compression and short-term dynamic loading. The model has been developed according to the results of uniaxial tests of concrete subjected to the compressive load. The elements of the structure are modeled by random variables distributed according to normal distribution law. The comparison of simulation results with known theoretical and experimental data is made.

Keywords: biaxial compression, triaxial compression, compressive stress, short-time dynamic action, random variable, elements of structural.

Расчет прочности бетона в условиях двух- и трехосного сжатия, а также в условиях действия кратковременного динамического одноосного сжатия продолжает оставаться актуальной задачей при проведении исследований. Имеющиеся экспериментальные данные требуют теоретического обобщения. Использование методов механики разрушения для решения подобных задач, являясь в целом перспективным, теряется в многообразии свойств бетона, зависящих от большого количества факторов.

В данной работе используется моделирование структуры бетона с целью определения его прочности в условиях двух- и трехосного сжатия и динамического нагружения [7, 8].

Допустим, что разрушение бетонного образца от возникающих трещин отрыва при различных силовых воздействиях указывает на одинаковые механизмы происходящего в его структуре при разрушении. Тогда при одноосном или двух-

осном сжатии, при кратковременном динамическом нагружении и в частном случае трехосного пропорционального сжатия ($\sigma_1 = \sigma_2 \leq 0, 1\sigma_3$), когда при разрушении образуются вертикальные трещины отрыва, возможно использование одной и той же модели.

Нарушение линейной зависимости между напряжениями и деформациями в условиях одноосного сжатия происходит при достижении напряжениями в бетоне величины R_t^0 — нижней параметрической точки на диаграмме деформирования [2], когда происходит постепенный рост трещин, характеризующийся накоплением неупругих деформаций. Если представить, что при росте сжимающих напряжений происходит последовательное разрушение отдельных структурных элементов, то минимальное значение прочности элементов структуры бетона соответствует R_t^0 при наибольшем значении прочности R_b . В общем случае прочность элементов

структуры, являясь случайной величиной σ_i , может быть распределена по нормальному закону со следующими характеристиками: математическое ожидание $\sigma_i = R_b$; в диапазоне от $\sigma_i = R_t^0$ до $\sigma_i = (2R_b - R_t^0)$ располагается не менее 95,4 % всех возможных значений σ_i ; дисперсия $D = (R_b - R_t^0)/2$. Представим сечение образца правильной квадратной решеткой. Каждый узел решетки имеет свое значение прочности σ_i — случайную величину, взятую из указанной выше выборки с нормальным законом распределения. При последовательном росте напряжений сжатия от $\sigma_i = 0$ до $\sigma_i = R_b$ происходит последовательное «разрушение» узлов. При напряжениях сжатия, равных R_b , количество «разрушенных» узлов составляет примерно 50 % от общего числа всех узлов решетки. Появление цепочки взаимосвязанных узлов, пересекающих исходную решетку, означает «разрушение» бетона. Этот процесс описывает поведение бетона при одноосном сжатии, а «разрушение» исходной решетки называется «неориентированным» (рис. 1, а). С появлением бокового обжатия по второму направлению, вертикальные трещины начинают ориентироваться в плоскости действия сжимающих напряжений. На исходной модели этот вид разрушения представляется появлением цепочки «взаимосвязанных» узлов, пересекающих исходную решетку в строго определенном направлении (рис. 1, б).

Расположение трещин в плоскости действия сжимающих напряжений — «ориентированное» разрушение — происходит при некотором значении бокового обжатия, когда часть элементов структуры «блокируется» боковым давлением. В первом приближении «степень блокировки» можно оценить как величину $\Delta\sigma_i = \sigma_i \cos \alpha_i$ (рис. 2). Тогда в узлы исходной решетки следует

Рис. 2. Схема для определения $\Delta\sigma_i$

подставить новые значения, а именно: $\sigma_{i2} = \sigma_i + \Delta\sigma_i = \sigma_i + \sigma_i \cos \alpha_i$, задавая α_i случайной величиной от 0 до 90°.

Выполним моделирование для решетки в 100 узлов (размер 10×10): бетоны с характеристиками $R_{b1} = 10,0$ МПа ($R_{t1}^0 = 2,0$ МПа, $D_1 = 4,0$ МПа) и $R_{b2} = 50,0$ МПа ($R_{t2}^0 = 22,23$ МПа, $D_2 = 13,88$ МПа).

На графике рис. 3 в координатах $\sigma_3/R_b - \sigma_1/R_b$ даны прямые, соответствующие «ориентированному» разрушению и «неориентированному» с учетом $\Delta\sigma_i$ для $R_{b1} = 10,0$ МПа и $R_{b2} = 50,0$ МПа, и выполнено сравнение с итоговыми графиками, приведенными в [5].

Представленная модель устойчиво описывает изменения прочности бетона при двухосном сжатии. Возможные увеличения/уменьшения прочности бетона в условиях двухосного сжатия при средних/максимальных уровнях бокового обжатия могут являться следствием условий проведения испытаний, а также технологии изготовления образцов.

При действии кратковременных динамических сжимающих нагрузок до времени нагружения не более 10^{-3} с разрушением бетонного образца происходит от образования вертикальных трещин отрыва. С уменьшением времени приложения нагрузки меняется и характер разрушения (разрушение с торцов испытуемого образца), что сопровождается значительным ростом прочности. Ограничивая время динамического воздействия $t = 10^{-3}$ с математическим ожидани-

Рис. 1. Схематичное представление решетки:
а — одноосное сжатие, «неориентированное» разрушение; б — сжатие по двум осям, «ориентированное» разрушение

Рис. 3. Прочность бетона при двухосном сжатии

ем, используем представленную выше модель — нормальное распределение с математическим ожиданием $\sigma_i = R_b$ и дисперсией $D = (R_b - R_i^0)/2$.

В этом случае происходит то же «ориентированное» разрушение, характеризующееся началом разрушения решетки от узла с минимальной прочностью в любом из направлений, но без «остановки» цепочки перед узлом с наибольшей прочностью, что, в конечном итоге, и определяет увеличение прочности [7, 9].

В табл. 1 выполнено сравнение максимально-го коэффициента динамического упрочнения по результатам моделирования с данными, приведенными в [1].

Используя предложенную модель, рассмотрен частный случай трехосного пропорционального сжатия — $\sigma_3 > \sigma_1 = \sigma_2$. В диапазоне прочности элементов структуры бетона от R_i^0 до $(2R_b - R_i^0)$ формируются трещины отрыва, приводящие к разрушению бетонного образца. С увеличением бокового обжатия рост трещин отрыва затруд-

няется и происходит изменение характера разрушения бетона [4] — развитие трещин сдвига. В работе [3] определена величина коэффициента бокового обжатия, при котором меняется угол наклона трещин к вертикальной оси испытываемого образца — переход трещин отрыва в трещины сдвига. При значениях напряжений $\sigma_1 = \sigma_2 \leq 0,1\sigma_3$ разрушение происходило от вертикальных трещин отрыва, а при значениях 0,2 и более — от трещин сдвига. Таким образом, наибольшие значения напряжений сжатия σ_3 при $\sigma_1 = \sigma_2 = 0,1\sigma_3$ не могут превышать величину $(2R_b - R_i^0)$, а в диапазоне $[0 \leq (\sigma_1 = \sigma_2) \leq 0,1\sigma_3]$ напряжения σ_3 могут определяться линейной зависимостью

$$\sigma_3 = R_b + 10,0(R_b - R_i^0)\sigma_1/\sigma_3, \quad (1)$$

где $R_i^0 = R_b(0,35 \lg R_b - 0,5)$.

Логарифм определяется по значению прочности бетона в кгс/см² [2].

Сравнение расчетных значений прочности при коэффициенте бокового обжатия $(\sigma_1/\sigma_3 = 0,05-0,1)$ с данными [5, 6] приведено в табл. 2.

Таблица 1

Сравнение значений коэффициентов динамического упрочнения $k_{ду} = \sigma_3/R_b$

Значения R_b , кг/см ²	Время нагружения, t , с	По данным, приведенным в работе [1], $k_{ду}$	По данным моделирования, $k_{ду, max}$
150–200	$(2,0 \dots 3,0) \cdot 10^{-3}$	1,38	1,51
280–340	$(2,0 \dots 3,0) \cdot 10^{-3}$	1,34	1,42
600	$3,0 \cdot 10^{-3}$	1,32	1,36
100–200	$1 \cdot 10^{-3}$	1,58	1,56
175	$4,3 \cdot 10^{-3}$	1,57	1,51
455	$1 \cdot 10^{-3}$	1,53	1,39

Таблица 2

Сравнение значений прочности бетона при трехосном сжатии $\sigma_3 > (\sigma_1 = \sigma_2)$

Значения R_b , кг/см ²	Величина бокового давления ($\sigma_1/\sigma_3 = \sigma_2/\sigma_3$)	Величина σ_3 , кг/см ²		
		по зависимости [5]*	по зависимости [6]**	по зависимости (1)
$R_b = 100,0$ $R_t^0 = 20,0$ $R_{bt} = 9,0$	0,05 0,1	189,0 204,0	130,0 188,7	140,0 180,0
$R_b = 410,0$ $R_t^0 = 181,0$ $R_{bt} = 26,0$	0,05 0,1	607,0 742,0	554,0 795,0	524,5 639,0

Примечания:

* $\sigma_3 = -R_b + \beta_n \sigma_t$; $\beta_n = (1 + a - a\sigma_1/\sigma_3)/[b + (f - b)\sigma_1/\sigma_3]$, где $b = 0,118$; $a = 0,5b$; $f = 1,0$;** $\sigma_3 = 2\sigma_o + 0,5(R_b - R_{bt}) + [4\sigma_o^2 + 4(R_b - R_{bt})\sigma_o + 0,25((R_b + R_{bt})^2)]^{1/2}$, где σ_o — величина бокового обжатия ($\sigma_o = \sigma_1 = \sigma_2$).

Таким образом, определяющим при прогнозировании прочностных свойств бетонов при двух- и трехосном сжатии, а также в условиях кратковременного динамического нагружения, в данной модели является значение нижней параметрической точки R_t^0 . Значение R_t^0 может считаться характеристикой пластических свойств бетона — чем выше ее значение, тем более хрупким является материал и тем меньшее влияние на увеличение прочности оказывают боковое обжатие и кратковременное нагружение. Данный факт нашел подтверждение во многих экспериментальных исследованиях и включен в некоторые теоретические зависимости, например, введением в них значения R_{bt} — прочности бетона при растяжении. Параметр R_t^0 зависит от структуры бетона и фактически может различаться даже для одних и тех же значений R_b , что затрудняет использование зависимости, представленной в [2]. Следовательно, определение нижней параметрической точки может быть рекомендовано в каждом конкретном случае при проведении испытаний по одноосному сжатию с дальнейшим ее использованием при моделировании.

В работе [10] представлена модель использовалась для оценки прочности бетонов при повторных воздействиях в условиях одноосного сжатия при высоких уровнях загрузки.

Библиографический список

1. Баженов Ю. М. Бетон при динамическом нагружении. М.: Стройиздат, 1970. 264 с.

2. Берг О. Я., Щербаков Е. Н., Писанко Г. Н. Высокопрочный бетон. М.: Стройиздат, 1971. 208 с.

3. Жиренков А. Н., Карцев Н. В., Красновский Р. О. Особенности разрушения существенно неоднородных материалов при одноосном и объемном сжатии // Вестник гражданских инженеров. 2009. № 3(20). С. 110–111.

4. Карпенко Н. И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 394 с.

5. Карпенко Н. И., Карпенко С. Н. К определению прочности бетона при трехосном сжатии // Жилищное строительство. 2013. № 7. С. 27–28.

6. Лукиша Л. К. Прочность бетона при сложном напряженном состоянии / Структура, прочность и деформации бетонов. М.: Стройиздат, 1966.

7. Майданич И. С., Нездоров А. С., Цветков С. В. Прочность и деформации бетона в условиях двухосного сжатия при статическом нагружении // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1991. № 4. С. 3–6.

8. Цветков С. В. К оценке статической модели разрушения бетона при двухосном сжатии // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 11. С. 30–31.

9. Цветков С. В. О максимальном значении коэффициента динамического упрочнения бетона при осевом сжатии // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1990. № 1. С. 126–128.

10. Цветков С. В. Определение резервов прочности бетона при одноосном сжатии по результатам статистического моделирования // Сб. науч. статей XX науч.-метод. конф. ВИТУ «Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций». СПб., 2016. С. 86–90.

References

1. Bazhenov Yu. M. *Beton pri dinamicheskom nagruzhenii* [Concrete at dynamic loading]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1970, 264 p.
2. Berg O. Ya., Shcherbakov E. N., Pisanko G. N. *Vysokoprochnyy beton* [High-strength concrete]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1971, 208 p.
3. Zhirenkov A. N., Kartsev N. V., Krasnovskiy R. O. *Osobennosti razrusheniya sushchestvenno neodnorodnykh materialov pri odnoosnom i ob'emnom szhatii* [Fracture features of significantly inhomogeneous materials in uniaxial and triaxial compression]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2009, no. 3(20), pp. 111–113.
4. Karpenko N. I. *Obshchie modeli mekhaniki zhelezobetona* [General models of mechanics of reinforced concrete]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1996, 394 p.
5. Karpenko N. I., Karpenko S. N. *K opredeleniyu prochnosti betona pri trekhosnom szhatii* [On the determination of durability of concrete at three-axis compression]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo – Housing construction*, 2013, no. 7, pp. 27–28.
6. Luksha L. K. *Prochnost' betona pri slozhnom napryazhennom sostoyanii* [Concrete durability at a complex strained condition]. *Struktura, prochnost' i deformatsii betonov* [Structure, durability and deformations of concrete]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1966.
7. Maydanich I. S., Nezderov A. S., Tsvetkov S. V. *Prochnost' i deformatsii betona v usloviyakh dvukhosnogo szhatiya pri staticheskom nagruzhenii* [Strength and deformations of concrete in the conditions of two-axis compression at static loading]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura – News of higher education institutions. Construction and architecture*, 1991, no. 4, pp. 3–6.
8. Tsvetkov S. V. *K otsenke staticheskoy modeli razrusheniya betona pri dvukhosnom szhatii* [To the assessment of static model of destruction of concrete at two-axis compression]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and civil engineering*, 2012, no. 11, pp. 30–31.
9. Tsvetkov S. V. *O maksimal'nom znachenii koefitsienta dinamicheskogo uprochneniya betona pri osevom szhatii* [About the maximum value of coefficient of concrete dynamic hardening at axial compression]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura – News of higher education institutions. Construction and architecture*, 1990, no. 1, pp. 126–128.
10. Tsvetkov S. V. *Opredelenie rezervov prochnosti betona pri odnoosnom szhatii po rezul'tatam statisticheskogo modelirovaniya* [Assessing the reserves of concrete durability at mono-axial compression by results of statistical modeling]. *Trudy XX nauch.-metod. konf. VITU «Defekty zdaniy i sooruzheniy. Usilenie stroitel'nykh konstruksiy»* [Proc. of the XX sci. conf. VITU "Defects of buildings and constructions. Strengthening of building constructions"]. St. Petersburg, 2016, pp. 86–90.