

12. Hirsch T. Modulus of Elasticity of Concrete Affected by Elastic Moduli of Cement Paste Matrix and Aggregate // *ACI Journal*. – 1962. – V. 59, № 3. – P. 427-447.
13. Counto V. The Effect of the Elastic Modulus of the Aggregate on the Elastic Modulus, Creep and Creep Recovery of Concrete // *Magazine of Concrete Research*. – 1964. – Vol. 16, № 48. – P. 129-138.
14. Сытник В.И., Иванов Ю.А. Результаты экспериментальных исследований прочностных и деформационных характеристик бетонов марок 600–1000. – Киев, НИИСК, 1966. – 32 с.
15. Дмитриев А.С. Деформации и напряжения крупного заполнителя в нагруженном бетоне и методика их исследования // *Методы испытания пористых заполнителей, легковесных смесей и легких бетонов на пористых заполнителях*: Сб. ст. – М.: Стройиздат, 1967. – С. 61–68.
16. Shah S. and Chandra S. Critical Stress, Volume Change, and Microcracking of Concrete // *ACI Journal*. – 1968. – Vol. 65, № 9. – P. 770–781.
17. Саканделидзе А.А. Исследование высокопрочных тяжелых бетонов на местных заполнителях: Автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.23.01. – Тбилиси, 1974. – 25 с.
18. Житкевич Р.К., Бужевич Г.А. Использование прочности компонентов конструктивного керамзитобетона // *Новое в технологии легких бетонов на пористых заполнителях*: Сб. ст. – М.: НИИЖБ, 1975. – С. 4–10.
19. Макаренко Л.П., Фенко Г.А. Некоторые вопросы упругости, ползучести и усадки цементного камня, раствора и бетона, их взаимосвязь // *Строительные конструкции*: Сб. ст. – Вып. 28. – Киев, 1976. – С. 75–82.
20. Литой щебень из доменных шлаков и бетоны на его основе / С.Е. Александров, В.А. Здоренко, И.В. Колпаков, П.А. Кривелев. – М.: Стройиздат, 1979. – 208 с.
21. Казацкий М.Б. Деформации и прочность бетона при сжатии и их моделирование с учетом структуры материала. Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / ВЗИСИ. – М., 1984. – 23 с.
22. Цава Г.Ф. Деформации и прочность бетона при растяжении с учетом особенностей структуры материала: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / ГПИ. – Тбилиси, 1985. – 25 с.
23. Раупов Ч.С. Прочность и деформации керамзитобетона при кратковременном и длительном сжатии и растяжении с учетом структуры материала: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / ВЗИСИ. – М., 1987. – 22 с.
24. Саралидзе Т.О. Деформации и прочность бетонов с добавкой С-3 при кратковременном и длительном нагружении и их моделирование с учетом структуры материала: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / ВЗИСИ. – М., 1987. – 22 с.
25. Клеблеев Э.К. Свойства высокопрочных бетонов и железобетонных элементов из них при повторных нагрузках: Автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.23.01. – Киев, 1990. – 14 с.
26. Harsh S., Shen Z. and Darwin D. Strain-Rate Sensitive Behavior of Cement Paste and Mortar in Compression // *ACI Materials Journal*. – 1990. – V. 87, № 5. – P. 508–516.
27. Свиридов Н.В., Коваленко М.Г., Чесноков В.М. Механические свойства особо прочного цементного бетона // *Бетон и железобетон*. – 1991. – № 2. – С. 7–9.
28. Giaccio G., Rocco C., Violini D., Zappitelli J., and Zerbino R. High-Strength Concretes Incorporating Different Coarse Aggregates // *ACI Materials Journal*. – 1992. – V. 89, № 3. – P. 242–246.
29. Baalbaki W., Aitcin P. and Ballivy G. On Predicting Modulus of Elasticity in High-Strength Concrete // *ACI Materials Journal*. – 1992. – V. 89, № 5. – P. 517–520.
30. Yang C., Huang R., Yeih W. and Sue I. Aggregate Effect on Elastic Moduli of Cement-Based Composite Materials // *Journal of Marine Science and Technology*. – 1995. – V. 3, № 1. – P. 5–10.
31. Yang C., Lin Y. and Huang R. Elastic Modulus of Concrete Affected by Elastic Moduli of Mortar and Artificial Aggregate // *Journal of Marine Science and Technology*. – 1996. – V. 4, № 1. – P. 43–48.
32. De Larrard F. and Belloc A. The Influence of Aggregate on the Compressive Strength of Normal and High-Strength Concrete // *ACI Materials Journal*. – 1997. – V. 94, № 5. – P. 417–426.
33. Yang C., Yang Y. and Huang R. The Effect of Aggregate Volume Ratio on the Elastic Modulus and Compressive Strength of Lightweight Concrete // *Journal of Marine Science and Technology*. – 1997. – V. 5, № 1. – P. 31–38.
34. Budi Aulia T., Deutshmann K. Effect of Mechanical Properties of Aggregate on the Ductility of High- Performance Concrete // *Leipzig Annual Civil Engineering Report*. – 1999. – № 4. – P. 133–148.
35. Cho S., Yang C. and Huang R. Effect of Aggregate Volume Fraction on the Elastic Moduli and Void Ratio of Cement-Based Composite Materials // *Journal of Marine Science and Technology*. – 2000. – V. 8, № 1. – P. 1–7.
36. Рыскин М.Н. Структурно-механические свойства и технология высокопрочного бетона: Дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / БНТУ. – Минск, 2002. – 296 с.
37. Haidar K., Pijaudier-Cabot G. Influence of Porosity on Fracture Characteristics in Mortar Structures // *Proceedings of 15th ASCE Engineering Mechanics Conference (EM-2002)*. – 2002. – 8 p.
38. Benazzouk A., Douzane O., Queneudec M. Transport of Fluids in Cement-rubber Composites // *Cement and Concrete Composites*. – 2004. – Vol. 26, № 1. – P. 21–29.

УДК 624.012.35

Рак Н.А.

СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БЕТОНА.

2. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИАГРАММЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ БЕТОНА

ВВЕДЕНИЕ

Современные методы расчета расчета железобетонных конструкций основаны на использовании диаграммы деформирования бетона при сжатии как обобщенной характеристики его механических свойств. Имеющиеся экспериментальные данные свидетельствуют о том, что полная диаграмма деформирования бетона при сжатии имеет как восходящую, так и нисходящую ветви. Границей между ветвями диаграммы является точка, соответствующая моменту достижения напряжениями в бетоне σ_c его предела прочности на сжатие f_c и относитель-

ными деформациями бетона ϵ_c пиковой относительной деформации ϵ_{c1} (при $\epsilon_c \leq \epsilon_{c1}$ наблюдается восходящая ветвь диаграммы, а при $\epsilon_c > \epsilon_{c1}$ — нисходящая). Многочисленные предложения по аналитическому описанию диаграммы деформирования бетона основаны на наиболее точном описании использованных при их выводе экспериментальных диаграмм. Различные предложения по описанию диаграмм деформирования бетона при сжатии подробно рассмотрены в

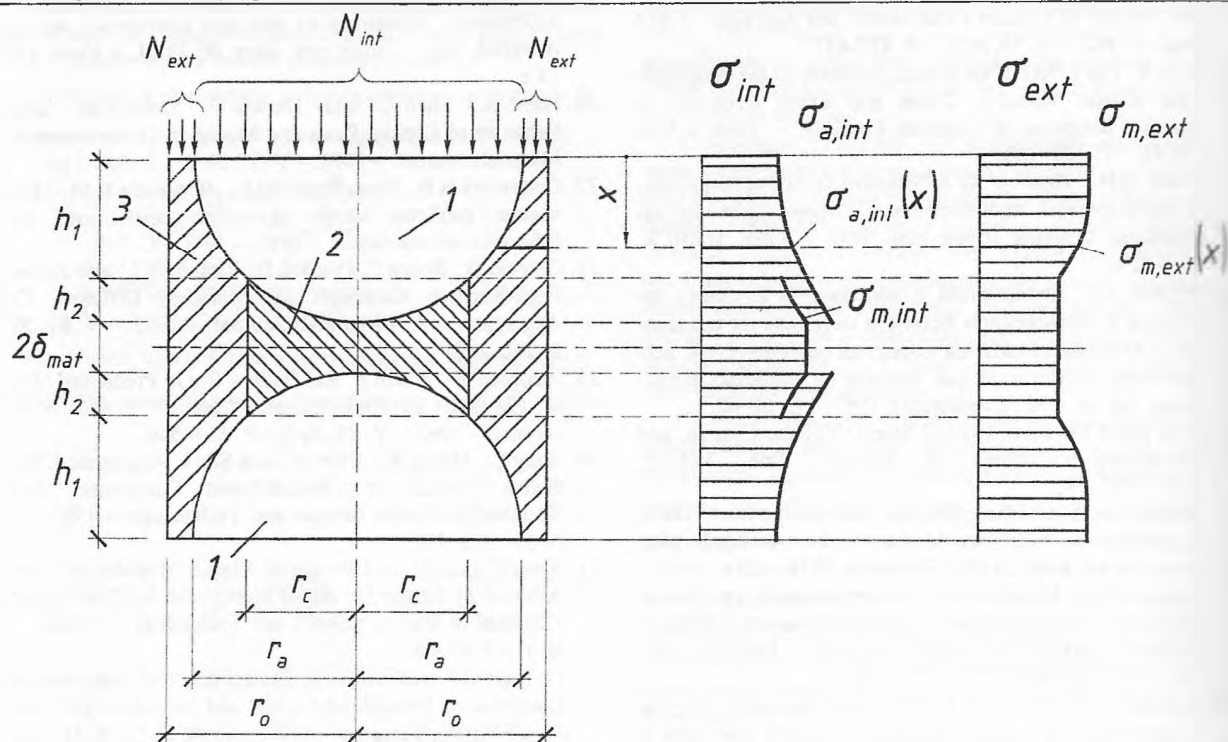


Рис. 1. К определению диаграмм деформирования элементов структурно-механической модели бетона

монографиях [1,2,3]. Все аналитические зависимости можно условно разделить на две основные группы. В предложениях первой группы обе ветви диаграммы описываются одной зависимостью, а в предложениях второй для каждой ветви даны отдельные зависимости.

В нормах проектирования бетонных и железобетонных конструкций [4,5] для выполнения нелинейных расчетов конструкций рекомендовано пользоваться зависимостью

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k-2)\eta}, \quad (1)$$

где $\eta = \epsilon_c / \epsilon_{c1}$; ϵ_{c1} — относительная деформация (%), соответствующая пиковой точке диаграммы деформирования, f_{cm} — средняя прочность бетона (МПа); $k = 1,1 \cdot E_c \cdot \epsilon_{c1} / f_{cm}$; E_c — модуль упругости бетона (ГПа), вычисляемый по формуле $E_{cm,n} = 22 \cdot (f_{cm} / 10)^{0,3}$. Зависимость (1) допускается использовать как на восходящей, так и на нисходящей ветви диаграммы, т.е. она относится к первой группе предложений. При этом использование нисходящей ветви деформирования ограничено величиной предельной относительной деформации ϵ_{cu1} . Величины ϵ_{c1} и ϵ_{cu1} установлены в нормах в зависимости от величины f_{cm} .

Норма [4,5] при расчете прочности сечений железобетонных конструкций допускается применять параболически-линейную диаграмму, для которой взаимосвязь между напряжениями σ_c и относительными деформациями ϵ_c описывается следующими зависимостями:

$$\text{при } \epsilon_c \leq \epsilon_{c2} \quad \frac{\sigma_c}{f_{cd}} = 1 - \left(1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c2}}\right)^n, \quad (2)$$

$$\text{при } \epsilon_{c2} \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cu2} \quad \frac{\sigma_c}{f_{cd}} = 1, \quad (3)$$

где f_{cd} — расчетное сопротивление бетона (МПа); n — показатель степени; ϵ_{c2} — относительные деформации (%), соответствующие максимальным напряжениям на диаграмме; ϵ_{cu2} — предельные относительные деформации (%) бетона. Величины n , ϵ_{c2} и ϵ_{cu2} установлены в нормах в зависимости от величины f_c . Таким образом, при расчете прочности сечений для расчета железобетонных конструкций норма использована зависимость, относящаяся ко второй группе предложений.

Параметры диаграмм деформирования, приведенные в нормах [4,5], зависят только от прочности бетона. При этом не учитываются технологические параметры бетона (состав бетонной смеси, свойства вяжущего и заполнителей, условия формирования и т.д.).

Для получения более обоснованных с этой точки зрения параметров диаграмм деформирования следует использовать структурный подход, являющийся наиболее перспективным направлением совершенствования теории прочности и деформативности бетона. Одним из возможных вариантов использования структурного подхода является структурно-механическое моделирование бетона как многокомпонентного материала, учитывающее реальное напряженно-деформированное состояние компонентов бетона при его сжатии.

Основные положения отвечающей этим требованиям структурно-механической модели бетона были сформулированы в проведенных ранее в Белорусском национальном техническом университете исследованиях [6,7]. Методика определения параметров структурно-механической модели изложена в статьях [8,9], а ее применимость для прогнозирования модуля деформаций бетона обоснована в статье [10], предваряющей данную статью. Ниже рассмотрены вопросы использования указанной структурно-механической модели для прогнозирования параметров диаграммы деформирования бетона.

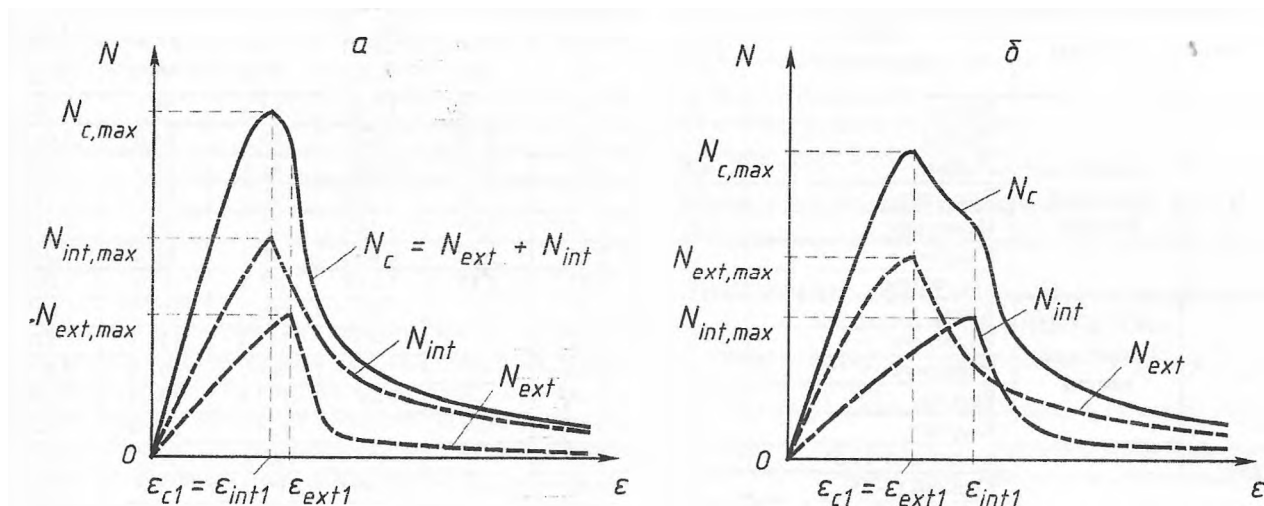


Рис. 2. Зависимость величины продольного усилия на модель от ее относительных деформаций

ДИАГРАММЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРНЫХ КОМПОНЕНТОВ БЕТОНА

В бетоне выделены два структурных компонента — матрица и расположенный в ней заполнитель. При этом для мелкозернистого бетона (цементно-песчаного раствора) матрицей считается цементный камень (cement paste), а заполнителем — песок (fine aggregate). Для трехкомпонентного бетона в качестве матрицы уже принимается цементно-песчаный раствор (cement mortar), а в качестве заполнителя — зерна крупного заполнителя (coarse aggregate).

Диаграммы деформирования цементного камня, мелкого и крупного заполнителя считаются известными.

Анализ данных исследований [11–13] показал, что для диаграммы деформирования цементного камня можно принять следующие зависимости:

на восходящей ветви (при $\epsilon_{cp} \leq \epsilon_{cp1}$)

$$\frac{\sigma_{cp}}{f_{cp}} = 1 - \left(1 - \frac{\epsilon_{cp}}{\epsilon_{cp1}} \right)^{n_{cp}}, \quad (4)$$

на нисходящей ветви (при $\epsilon_{cp} > \epsilon_{cp1}$)

$$\frac{\sigma_{cp}}{f_{cp}} = \left(\frac{\epsilon_{cp1}}{\epsilon_{cp}} \right)^{k_{cp}}, \quad (5)$$

в которых f_{cp} — прочность цементного камня на сжатие (МПа); ϵ_{cp1} — относительные деформации (%) цементного камня, соответствующие максимальным напряжениям на диаграмме, параметры n_{cp} и k_{cp} определяют характер диаграммы деформирования.

Эти параметры следует определять по формулам

$$n_{cp} = E_{cp} \cdot \epsilon_{cp1} / f_{cp}, \quad (6)$$

$$k_{cp} = \frac{\ln(0,5)}{\ln(\epsilon_{cp1} / \epsilon_{cp0,5})}, \quad (7)$$

в которых E_{cp} — начальный модуль упругости цементного камня (ГПа), $\epsilon_{cp0,5}$ — относительные деформации (%) цементного камня на ниспадающей ветви при напряжениях, равных половине максимального напряжения на диаграмме.

Анализ показал, что для цементного камня с ростом его прочности f_{cp} от 20 до 150 МПа величина параметра n_{cp} уменьшается от 2,5 до 1,25. Следует отметить, что объем экс-

периментальных данных о поведении цементного камня на ниспадающей ветви весьма ограничен. Однако имеющиеся данные свидетельствуют о, как правило, хрупком характере разрушения цементного камня, при котором величина параметра k_{cp} изменяется в пределах от 15 до 20. В связи с этим до получения более достоверных данных рекомендуется величину коэффициента k_{cp} принимать равной 15.

Анализ данных исследований [11–13] показал, что для диаграмм деформирования мелкого и крупного заполнителя можно принять аналогичные зависимости с заменой во всех выражениях индексов cp на индексы fa и ca соответственно для мелкого и крупного заполнителя.

При этом для природного плотного заполнителя величина параметра n_{fa} или n_{ca} практически не зависит от его прочности и изменяется в пределах от 1,02 до 1,10. В связи с этим рекомендуется принимать для расчетов величину коэффициента 1,05. Что касается величины параметра k_{fa} или k_{ca} , то он изменяется в значительных пределах от 1,1 до 6. Однако большинство опытных данных расположено в пределах от 1,6 до 2,8. В связи с этим до получения более достоверных данных рекомендуется принимать величину коэффициента k_{fa} или k_{ca} равной 2.

МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ БЕТОНА

Структурно-механическая модель бетона состоит из работающих параллельно двух элементов — центрального и наружного (рис. 1).

Наружный элемент (3 на рис. 1) имеет цилиндрическое сечение с полостью переменного радиуса и имитирует менее нагруженную часть матрицы.

Приложим к наружному элементу усилие такой величины, когда на верхнем и нижнем торцах величина относительной деформации в материале матрицы (цементном камне для мелкозернистого бетона, цементно-песчаном растворе для трехкомпонентного бетона) составит ϵ_m . При этом напряжения в матрице в сечениях, расположенных на верхнем и нижнем торцах наружного элемента, составят

Таблица. Основные результаты вычислений параметров диаграммы

Источник	Матрица	Вид заполнителя	Шифр	$\epsilon_{c1,mod}$ %	$\epsilon_{c1,obs}$ %	$\frac{\epsilon_{c1,mod}}{\epsilon_{c1,obs}}$	$f_{c,mod}$, МПа	$f_{c,obs}$, МПа	$\frac{f_{c,mod}}{f_{c,obs}}$
[14]	Цементно-песчаный раствор	Базальт	B	1.86	1.50	1.240	84.3	78.0	1.081
		Диабаз	D	1.94	2.10	0.923	85.3	84.0	1.015
		Габбро	Gb	2.17	2.30	0.943	91.3	88.0	1.038
		Гранулит	Gr	2.52	2.60	0.969	99.6	80.0	1.245
		Известняк	L	2.18	1.90	1.147	81.1	70.0	1.159
		Кварцит	Q	2.15	2.50	0.860	91.3	88.0	1.038
		Серпентин	S	2.14	2.10	1.019	89.6	82.0	1.093
[15]	Цементный камень	Кварц	2	2.33	—	—	108.1	106.3	1.017
		Известняк	5	2.72	—	—	113.9	112.1	1.016
		Известняк	8	2.24	—	—	89.3	101.9	0.876
		Базальт	10	2.45	—	—	111.1	104.9	1.059
		Кварцит	12	3.14	—	—	124.1	108.4	1.145
	Цементно-песчаный раствор	Кремень (5-12,5)	3	1.90	—	—	92.0	90.5	1.017
		Кремень (5-25)	4	1.92	—	—	90.0	86.8	1.037
		Известняк (5-12,5)	6	2.18	—	—	110.6	109.5	1.010
		Известняк (5-25)	7	2.17	—	—	109.9	107.7	1.020
		Известняк (5-25)	9	2.19	—	—	85.8	89.0	0.964
		Базальт (6-20)	11	2.00	—	—	101.4	90.9	1.116
		Кварцит (4-20)	13	2.39	—	—	113.0	101.8	1.110
		[16]	Цементно-песчаный раствор	Полистирол (3-7)	ЕСН1	1.52	—	—	39.36
ЕСН2	1.39				—	—	30.78	27.6	1.115
ЕСН3	1.25				—	—	23.32	23.7	0.984
ЕСН4	1.12				—	—	17.29	16.1	1.074
Итого среднее						1.015	—	—	1.056
Коэффициент вариации						0.132	—	—	0.071

$$\sigma_{m,ext} = f_m \left[1 - \left(1 - \frac{\epsilon_m}{\epsilon_{m1}} \right)^{n_m} \right], \quad (8)$$

а усилие в наружном элементе можно определить

$$N_{ext} = \pi \cdot (r_o^2 - r_a^2) \cdot \sigma_{m,ext} \quad (9)$$

Тогда напряжения в матрице в сечении наружного элемента, отстоящем на расстоянии x от торца модели, можно определить по формулам

при $0 \leq x \leq h_1$

$$\sigma_{m,ext}(x) = \frac{N_{ext}}{\pi \cdot (r_o^2 - r_a^2 + x^2)} \quad (10)$$

при $h_1 \leq x \leq r_a + \delta_{mat}$

$$\sigma_{m,ext}(x) = \frac{N_{ext}}{\pi \cdot (r_o^2 - r_c^2)} \quad (11)$$

Соответствующие этим напряжениям величины относительных деформаций можно определить по следующей зависимости

$$\epsilon_{m,ext}(x) = \epsilon_{m1} \left[1 - \left(1 - \frac{\sigma_{m,ext}(x)}{f_m} \right)^{\left(\frac{1}{n_m}\right)} \right]. \quad (12)$$

В результате подстановки в (12) величин напряжений по (10) и (11) получается зависимость, связывающая относительные деформации в любом сечении наружного элемента с действующим в этом элементе усилием N_{ext} .

Используя эту зависимость, необходимо получить полное укорочение наружного элемента при действии усилия N_{ext} . Для этого необходимо взять определенный интеграл по x в пределах всей длины элемента. Однако, несмотря на неслож-

ный вид получаемой зависимости, вычислить указанный интеграл в замкнутом виде оказалось возможным только для натуральных значений параметра n_m . Поскольку, как правило, фактические значения параметра n_m не являются натуральными числами, интеграл следует определять методом численного интегрирования.

Для этого наружный элемент модели разделяется на горизонтальные слои. Причем величины толщины слоя следует принимать одинаковыми в пределах каждого из размеров h_1 , h_2 и δ_{mat} .

В результате численного интегрирования получают величину укорочения наружного элемента Δ_{ext} , а затем величину относительной деформации наружного элемента модели

$$\epsilon_{ext} = \frac{\Delta_{ext}}{2 \cdot (h_1 + h_2 + \delta_{mat})}. \quad (13)$$

Пошагово увеличивая относительную деформацию ϵ_m матрицы, получаем на каждом шаге соответствующее ей усилие N_o и относительную деформацию ϵ_{ext} наружного элемента модели, т.е. в итоге получается зависимость $N_{ext} = f(\epsilon_{ext})$.

Для нахождения указанной зависимости на ниспадающей ветви было принято допущение от том, что на всем протяжении этой ветви отношение $\epsilon_{ext}/\epsilon_m$ остается постоянным и равным этому отношению, полученному при $\epsilon_m = \epsilon_{m1}$, т.е. при максимальной величине усилия в наружном элементе.

В центральный элемент входят два полушара (1 на рис. 3), имитирующих заполнитель, и соединяющий полушары средний элемент (2 на рис. 3) цилиндрического сечения, имитирующий наиболее нагруженную часть матрицы.

В связи с наличием в центральном элементе двух компонентов задача определения его укорочения становится более сложной, чем для наружного элемента модели.

Первоначально определяют, по какому из сечений будет происходить разрушение центрального элемента. В случае, когда прочность заполнителя больше чем прочность матрицы, разрушение центрального элемента будет происходить по матрице в пределах центральной зоны длиной $2\delta_{mat}$. При прочности заполнителя менее чем прочность матрицы разрушение центрального элемента будет происходить по заполнителю на расстоянии h_1 от верха элемента.

Приложим к центральному элементу усилие такой величины, когда в центральной зоне элемента длиной $2\delta_{mat}$ величина относительной деформации в материале матрицы (цементном камне для мелкозернистого бетона, цементно-песчаном растворе для трехкомпонентного бетона) составит ϵ_m . Тогда напряжения в матрице в центральной зоне составят

$$\sigma_{m,int} = f_{m1} \left[1 - \left(1 - \frac{\epsilon_m}{\epsilon_{m1}} \right)^{n_m} \right]. \quad (14)$$

Тогда усилие в центральном элементе можно определить

$$N_{int} = \pi \cdot r_c^2 \cdot \sigma_{m,int}. \quad (15)$$

Теперь напряжения в заполнителе в сечении центрального элемента, отстоящем на расстоянии x от торца модели, можно определить при $0 \leq x \leq h_1$ по формуле

$$\sigma_{a,int}(x) = \frac{N_{int}}{\pi \cdot (r_a^2 - x^2)}. \quad (16)$$

Соответствующие этим напряжениям величины относительных деформаций можно определить с использованием следующей зависимости, полученной преобразованием зависимости (4)

$$\epsilon_{a,int}(x) = \epsilon_{a1} \left[1 - \left(1 - \frac{\sigma_{a,int}(x)}{f_a} \right)^{\left(\frac{1}{n_a} \right)} \right]. \quad (17)$$

На участке длиной h_2 центрального элемента в сечение попадают одновременно два материала (матрица и заполнитель). При этом в любом сечении на этом участке относительные деформации обоих материалов равны.

Участок длиной h_2 разбивается на слои, в каждом из которых определяется площадь заполнителя и площадь матрицы. Для каждого слоя задаются величиной относительной деформацией в сечении, расположенном по срединной плоскости слоя, находят по ней величины напряжений в заполнителе и матрице, а затем величину усилия, воспринимаемого сечением. Постепенно повышая величину относительной деформации, добиваются совпадения величины усилия в данном слое с усилием N_{int} . Такая процедура выполняется для каждого слоя, расположенного в пределах участка длиной h_2 .

В результате численного интегрирования по всем участкам центрального элемента модели получают величину Δ_{int} укорочения центрального элемента модели.

Тогда относительная деформация центрального элемента модели составит

$$\epsilon_{int} = \frac{\Delta_{int}}{2 \cdot (h_1 + h_2 + \delta_{mat})}. \quad (18)$$

Пошагово увеличивая относительную деформацию $\epsilon_{m,int}$ матрицы на центральном участке элемента, получаем на каждом шаге соответствующей ей величины усилия N_{int} и отно-

сительной деформации ϵ_{int} центрального элемента модели, т.е. в итоге получается зависимость $N_{int} = f(\epsilon_{int})$.

Для нахождения указанной зависимости на ниспадающей ветви было принято допущение от том, что на всем протяжении этой ветви отношение $\epsilon_{int}/\epsilon_m$ остается постоянным и равным этому отношению, полученному при $\epsilon_m = \epsilon_{m1}$, т.е. при максимальной величине усилия в центральном элементе.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИАГРАММЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ БЕТОНА

После получения зависимостей $N_{ext} = f(\epsilon_{ext})$ и $N_{int} = f(\epsilon_{int})$, связывающих усилия в элементах структурно-механической модели с относительными деформациями элементов, строится график зависимости суммарного усилия $N_c = N_{ext} + N_{int}$ на модель от относительной деформации в ней $\epsilon_c = \epsilon_{ext} = \epsilon_{int}$. Примерный вид получаемых зависимостей представлен на рис. 2.

Разделив величину суммарного усилия N_c на площадь модели $A_c = \pi \cdot r_o^2$, получим напряжения в бетоне при соответствующей величине относительных деформаций бетона ϵ_c в модели.

Полученное максимальное напряжение в модели $\sigma_{c,max} = N_{c,max}/A_c$ соответствует пределу прочности бетона на сжатие f_c , а полученная при этом величина относительных деформаций соответствует пиковой относительной деформации бетона ϵ_{c1} .

Рассмотрение приведенных на рис. 2 результатов прогнозирования диаграммы деформирования бетона показало, что могут наблюдаться две основных формы разрушения бетона.

При первой форме разрушения (рис. 2, а) сначала достигает своего максимума $N_{int,max}$ усилие во внутреннем элементе модели. При этом усилие в наружном элементе N_{ext} еще не достигло своего максимума $N_{ext,max}$, т.е. прочность этого элемента использована не полностью. Это означает, что разрушение произойдет по оси, соединяющей зерна заполнителя, по матрице в области между зёрнами заполнителя (форма разрушения 1а) либо по заполнителю в переходной области (форма разрушения 1б).

При второй форме разрушения (рис. 2, б) сначала достигает своего максимума $N_{ext,max}$ усилие в наружном элементе модели. При этом усилие во внутреннем элементе N_{int} еще не достигло своего максимума $N_{int,max}$, т.е. прочность внутреннего элемента использована не полностью. Это означает, что разрушение произойдет по матрице, окружающей зерна заполнителя в плоскости их расположения, перпендикулярной направлению сжатия бетона.

Анализ полученных результатов показал, что наиболее полное использование прочности компонентов бетона достигается при одновременном достижении наружным и внутренним элементом модели максимальных величин $N_{int,max}$ и $N_{ext,max}$.

Таким образом, условие оптимальности подбора состава по критерию прочности бетона можно сформулировать следующим образом — при подборе состава бетона следует обеспечить равенство пиковых деформаций наружного и внутреннего блоков структурно-механической модели, т.е. должно выполняться условие $\epsilon_{ext1} = \epsilon_{int1}$. Выполнение этого условия (при известных диаграммах деформирования компо-

нентов бетона) может быть достигнуто путем соответствующего подбора объемной концентрации заполнителя.

Таким образом, важными достоинствами предложенной структурно-механической модели бетона являются не только общность методологии рассмотрения диаграмм деформирования для бетонов с плотным и пористым заполнителем (при различных соотношениях между модулями деформаций компонентов бетона), но и выявление предполагаемой формы разрушения бетона, а также установление оптимальности состава бетона по критерию прочности.

С помощью разработанной структурно-механической модели были выполнены расчеты по экспериментальным данным [14-16] для бетонов различных составов и прочности. Основные сведения о выборке опытных образцов приведены в таблице. Следует отметить, что наибольшей полнотой изложения исходных экспериментальных данных характеризуются исследования Budi Aulia T., Deutshmann K. [15], в которых в качестве матрицы использовался цементно-песчаный раствор (на кварцевом песке) одного состава, а в качестве заполнителей использовалось 7 различных видов заполнителей.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что разработанная структурно-механическая модель бетона позволяет с приемлемой точностью прогнозировать параметры диаграммы деформирования бетона при сжатии.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Карпенко Н.И. Общие модели механики бетона. — М.: Стройиздат, 1996. — 416 с.
2. Холмянский М.М. Бетон и железобетон: Деформативность и прочность. — М.: Стройиздат, 1997. — 576 с.
3. Тур В.В., Рак Н.А. Прочность и деформации бетона в расчетах железобетонных конструкций: Монография. — Брест, БГТУ, 2003. — 252 с.
4. PrEN 1992-1-1:2003. Design of concrete structures. General. Common rules for building and civil engineering structures. — Brussels, CEN, 2003.
5. СНБ 5.03.01-02 Бетонные и железобетонные конструкции. Мн: РУП «Стройтехнорм», 2003. — 140 с.
6. Разработка расчетной модели учета структуры высокопрочного бетона при определении его предельной сжимаемости и несущей способности конструкций в условиях нагружения с градиентом деформаций: Отчет о НИР (заключит.) / Белорусская государственная политехническая академия; Рук. Н.А. Рак. — №ГР2000522. — Минск, 2000. — 55 с.
7. Расчет конструкций из высокопрочного бетона учетом их контактного взаимодействия в каркасных зданиях: Отчет о НИР (заключит.) / Белорусская государственная политехническая академия; Рук. Н.А. Рак.— № ГР 2001770.— Минск, 2001.— 118 с.
8. Рак Н.А. К построению методики расчета железобетонных конструкций с учетом неоднородности структуры бетона // Вестник БГТУ. Строительство и архитектура. — 2001. — № 1(7) — С. 90-99.
9. Рак Н.А. Стержневая расчетная модель бетона как структурно неоднородного материала // Вестник БГТУ. Строительство и архитектура. — 2003. — № 1(19) — С. 145-151.
10. Рак Н.А. Структурно-механическая модель бетона. 1. Прогнозирование модуля деформаций бетона // Вестник БГТУ. Строительство и архитектура. — 2004. — № 1(25).
11. Shah S. and Chandra S. Critical Stress, Volume Change, and Microcracking of Concrete // ACI Journal. — 1968. — Vol. 65, № 9. — P. 770-781.
12. Harsh S., Shen Z. and Darwin D. Strain-Rate Sensitive Behavior of Cement Paste and Mortar in Compression // ACI Materials Journal. — 1990. — V. 87, № 5. — P. 508-516.
13. Рыскин М.Н. Структурно-механические свойства и технология высокопрочного бетона: Дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / БНТУ. — Минск, 2002. — 296 с.
14. Budi Aulia T., Deutshmann K. Effect of Mechanical Properties of Aggregate on the Ductility of High- Performance Concrete // Leipzig Annual Civil Engineering Report. — 1999. — № 4. — P. 133-148.
15. De Larrard F. and Belloc A. The Influence of Aggregate on the Compressive Strength of Normal and High-Strength Concrete // ACI Materials Journal. — 1997. — V. 94, № 5. — P. 417-426.
16. Haidar K., Pijaudier-Cabot G. Influence of Porosity on Fracture Characteristics in Mortar Structures // Proceedings of 15th ASCE Engineering Mechanics Conference (EM-2002). — 2002. — 8 p.

УДК 666.97.12:620.18.001.5

Рыскин М.Н., Рак А.Н.

К ВОПРОСУ О КОМПОЗИЦИЯХ, СТРУКТУРЕ И РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ САМОУПЛОТНЯЮЩИХСЯ БЕТОНОВ

Применительно к технологии бетона термин самоуплотнение подразумевает способность бетонной смеси без расслоения заполнять предоставленное ей пространство, т.е. форму с арматурным каркасом, и уплотняться без какого-либо механического воздействия (например, вибрационного), только под влиянием собственного веса или, что более точно, от действия исключительно гравитационных сил.

Удобоукладываемость самоуплотняющихся бетонов (СУБ) может характеризоваться следующими свойствами [1]: 1) заполняющая способность (текучесть); 2) проникающая способность (отсутствие блокировки между арматурой или узкими опалубочными полостями); 3) устойчивость к расслоению (стабильность). Только в случае соответствия всех трех свойств заданным значениям бетонная смесь может быть определена как СУБ.

Для оценки удобоукладываемости СУБ наиболее предпочтительными следует считать реологические методы [2,3]. Измеряемые по ним реологические константы наиболее точно позволяют судить о реальных процессах, происходящих в бетонных смесях. Консистенцию структурированной, пластично-

вязкой среды, каковой является бетонная смесь, наиболее полно описывают следующие характеристики: предельное напряжение сдвига, вязкость, угол внутреннего трения.

С одной стороны бетонная смесь СУБ должна обладать высокой деформативностью, которая обеспечивает заполнение опалубки смесью и ее уплотнение под действием только собственного веса. Т.е. с точки зрения реологии смесь должна иметь низкое значение τ_0 — предельного напряжения сдвига. С другой стороны должно быть достигнуто высокое сопротивление расслоению между крупным заполнителем и растворной частью при транспортировании бетонной смеси и ее течения через участки опалубки с высокой концентрацией арматурных стержней. Это условие обеспечивается, если смесь обладает высокой вязкостью (ν) растворной составляющей (цементного теста). На рис. 1 показано, что область бетонных смесей, обладающих свойствами самоуплотнения, соответствует определенным диапазонам изменения реологических констант бетонной смеси ν и τ_0 [4].