



УДК 697.137.2

## О ВЛИЯНИИ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ НА МОДУЛЬ УПРУГОСТИ БЕТОНА

*Павлова И. П.*

*Брестский государственный технический университет*

Хорошо известно, что бетон представляет собой композитный материал. Поэтому на прочностные и деформативные свойства бетона оказывают влияние как характеристики цементного камня, так и свойства заполнителей. В 1958 г. Hansen [1] предложил две модели для описания структуры бетона. Первая модель представляет собой материал, состоящий из стальной матрицы с внедренными в нее включениями из резины. Для этой модели применима зависимость

$$E_b = \frac{V_z}{V_b} \cdot E_z + \left(1 - \frac{V_z}{V_b}\right) \cdot E_M \quad (1)$$

где  $E_b$ ,  $E_z$ ,  $E_M$  – модули упругости бетона, заполнителя и цементного камня, соответственно,

$V_z$ ,  $V_b$  – абсолютные объемы заполнителя и бетона, соответственно.

Второй модели удовлетворяет фиктивный двухкомпонентный материал, состоящий из матрицы мягкой резины с дисперсно распределенными в ней стальными включениями. Для этой модели модуль упругости определяется из выражения:

$$E_b = \frac{1}{\frac{V_M}{E_M} + \frac{V_3}{E_3}} \quad (2)$$

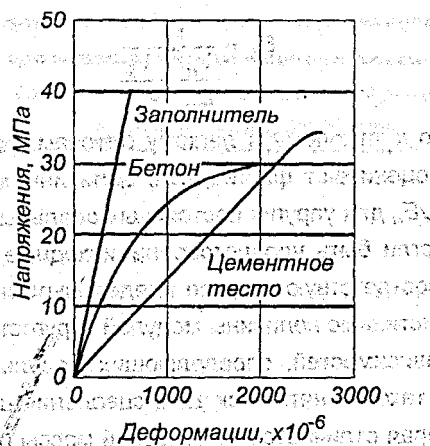
Применительно к тяжелому и легкому бетонам формулы (1) и (2) лишь приблизительно оценивают фактические величины модулей упругости, так как отношения  $E_3/E_M$  для упругих постоянных реальных материалов не столь велики, чтобы могли быть удовлетворены исходные предпосылки. Зависимости (1) и (2) соответствуют скорее предельным значениям, между которыми находятся истинные величины модулей упругости бетонов.

Ни одна из зависимостей, определяющих модуль упругости бетона, не включает в себя такое понятие как зона сцепления цементного камня с заполнителем, которая отличается от основной массы цементного геля и в которой образуются микротрещины.

Возвращаясь к композитной природе бетона, необходимо отметить, что, как и заполнитель, так и твердеющий цементный гель, подверженные нагружению, имеют практически линейные зависимости «напряжения — деформации» (рис. 1) [2]. Некоторая нелинейность зависимости для цементного геля может быть объяснена возникновением микротрещин при высоких напряжениях. Криволинейность зависимости «напряжения — деформации» для бетона может быть объяснена, базируясь на представлении о зоне сцепления твердеющего цементного камня и заполнителя, в которой происходит микротрещинообразование даже при ограниченном нагружении.

Почему зона сцепления отличается от основной массы твердеющего цементного камня? Микроструктура зоны сцепления сильно зависит от формирования и уплотнения бетона. На этой стадии частицы цемента неспособны плотно упаковаться из-за достаточно больших гранул заполнителя. Этот граничный эффект определяет, что меньшее количество цемента прогидратирует и заполнит поры в свежееуплотненной смеси. И, как следствие, зона сцепления имеет большую пористость, чем твердеющий цементный камень на расстоянии от заполнителя [3].

Зона сцепления существует не только на поверхности крупного заполнителя, но и на поверхности мелкого [4]. Здесь толщина зоны меньше, но в итоге все зоны суммируются в довольно значительный объем [4]: он находится в пределах  $1/3 - 1/2$  общего объема твердеющего цементного камня.



**Рис.1** Диаграмма «напряжения — деформации» для цементного теста, заполнителей и бетона согласно [2].

Если модуль упругости бетона или раствора принять как функцию количества и модулей упругости составляющих, то повышение жесткости одной из составляющих приведет к увеличению модуля упругости бетона или раствора. Результаты испытаний прочности бетона на сжатие показывают [5], что наиболее высокие значения достигаются в том случае, когда модуль упругости заполнителя равен модулю упругости матрицы раствора. При значении модуля упругости заполнителя выше или ниже значения модуля упругости матрицы прочность раствора (бетона) снижается.

Увеличение содержания заполнителя в случае  $E_s \gg E_p$  вызывает увеличение  $E_b$ , однако при этом происходит более интенсивное микротрещинообразование под нагрузкой. Результаты испытания бетона с высоким объемным содержанием крупного заполнителя и при полном заполнении межзерновых пустот цементным камнем, приведенные И. Н. Ахвердовым [6], показывают, что в этом случае прочность бетона снижается более интенсивно, чем бетона и раствора с низким отношением «заполнитель — цементный камень». Другими словами, варьирование количества заполнителя в бетоне оказывает совершенно различное влияние на его прочность и модуль упругости. В работе А. Cetin и R. L. Carrasquillo [7] рассматривается влияние процентного содержания и максимального размера заполнителей на прочностные и деформативные свойства бетона. Все полученные экспериментальные данные сравнивались с теоретическими согласно уравнениям, предложенным ACI 318 и ACI 363 для обычного и высокопрочного бетонов, соответственно.

$$E_c = 4730 \cdot (f_c')^{0.5}, \text{ МПа} \quad (3)$$

$$E_c = 3320 \cdot (f_c')^{0.5} + 6890, \text{ МПа} \quad (4)$$

Исследовались бетоны на различных видах заполнителей при процентном содержании заполнителя в бетоне 36%, 40% и 44% соответственно. Большой разброс экспериментальных данных по сравнению с теоретическими (рис. 2) показывает, что такая характеристика, как прочность не может в достаточной степени охарактеризовать такое свойство бетона как модуль упругости. Модуль упругости в значительной степени зависит от свойств заполнителя, таких как: минералогия, процентное содержание, размер и форма зерен.

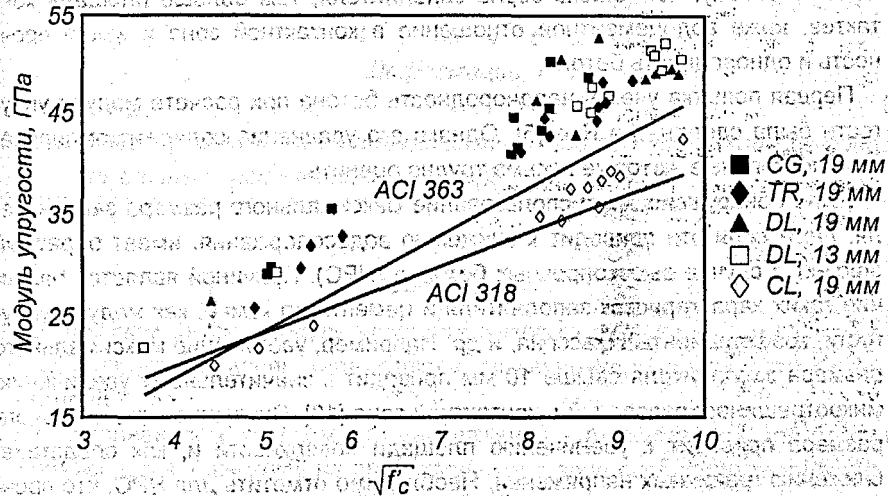


Рис. 2 Зависимость модуля упругости от  $\sqrt{f_c}$  для бетонов на различных видах заполнителя согласно [7].

Нельзя отрицать того, что для одного и того же вида крупного заполнителя при постоянном количестве его в бетоне изменение качества цементного камня влияет на прочность при сжатии так же, как и на модуль упругости бетона. В данном случае изменение деформативно-прочностных свойств одного компонента бетона влияет на изменение свойств двухкомпонентной системы в целом. Поэтому имеет место зависимость  $E_c = f(f_c)$ . Введение других видов заполнителей при прочих равных условиях легко нарушает эту взаимосвязь, так как в выражениях прочности бетона не учитываются де-

формативно-прочностные свойства заполнителей. Зависимости  $f_c = f(w/c; f_n)$  и  $E_c = f(f_c)$  не учитывают этих факторов, а поэтому не могут быть общими для всех видов бетонов.

Сведения о зависимости прочности и деформативности бетона от гранулометрии и объемной концентрации заполнителей весьма противоречивы. В работе И. М. Френкеля [8] отмечается, что цементный камень на поверхности заполнителя менее прочен, чем в слое отдаленного заполнителя. По его мнению, уменьшение крупности заполнителей приводит к увеличению числа дефектов структуры и снижению прочности.

С другой стороны, Н. В. Михайлов [9] отмечает, что вода в пленке цементного теста на поверхности заполнителей распределена неравномерно: её содержание увеличивается от поверхности заполнителя к периферии оболочки. Поэтому, чем ближе зерна заполнителя, тем больше площадь контактов, ниже водоцементное отношение в контактной зоне и выше прочность и однородность бетона.

Первая попытка учесть неоднородность бетона при расчете модуля упругости была сделана La Rue [5]. Однако его уравнение содержит эмпирические постоянные, которые весьма трудно оценить.

Было обнаружено, что использование максимального размера заполнителя, даже если это приводит к снижению водосодержания, имеет обратный эффект в случае высокопрочных бетонов (НРС). Причиной является различие таких характеристик заполнителя и цементного камня, как модули упругости, коэффициенты Пуассона, и др. Например, увеличение максимального размера заполнителя свыше 10 мм приводит к значительному увеличению микротрещинообразования в контактной зоне [10]. Снижение максимального размера приводит к увеличению площади поверхности и, как следствие, снижению граничных напряжений. Необходимо отметить для НРС, что прочность цементного камня высока из-за низкого водоцементного отношения и низкой пустотности. По этой причине, модуль упругости цементного камня не слишком отличается от модуля упругости заполнителя. Эта ситуация способствует лучшему сцеплению и более монолитному поведению.

Neville [2, 10] в своих исследованиях пришел к выводу, что линейная часть диаграммы «напряжения – деформации» в НРС достигает максимума, соответствующему 85% предельной прочности или даже выше (рис. 3). Трещинообразование в НРС проходит как через цементный камень, так и через частицы заполнителя. В высокопрочных бетонах заполнитель уже не действует как ограничитель трещин, и в результате разрушение более хрупкое.

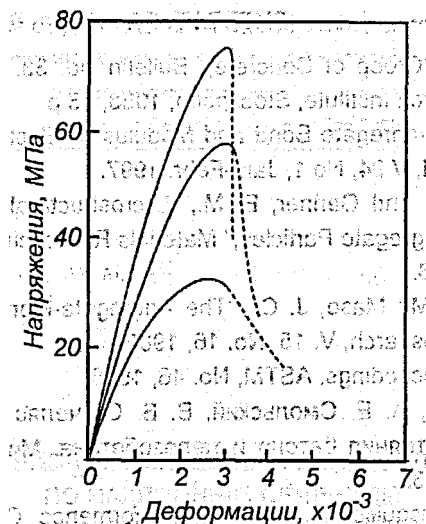


Рис. 3 Зависимость между напряжениями и деформациями для бетонов различных прочностей согласно [2].

### ВЫВОДЫ

1. В обычном бетоне модуль упругости матрицы значительно меньше модуля упругости заполнителя, отсюда снижение модуля упругости самого бетона.
2. Криволинейность зависимости «напряжения – деформации» для бетона объясняется, базируясь на представлении о зоне сцепления твердеющего цементного камня и заполнителя, в которой происходит микротрещинообразование даже при ограниченном нагружении.
3. В высокопрочных бетонах нет такой существенной разницы между модулем упругости матрицы и заполнителя, поэтому такому бетону соответствует более однородное поведение и, как следствие, более хрупкое разрушение.
4. Нет прямой зависимости модуля упругости бетона от его прочности. Величина модуля упругости зависит не только от свойств цементного камня, но также от вида и свойств заполнителя.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Hansen, T. C., "Creep of Concrete," Bulletin No. 33, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1958, 48 p.
2. Neville, A. M., "Aggregate Bond and Modulus of Elasticity of Concrete," ACI Materials Journal, V 94, No 1, Jan.-Febr. 1997.
3. Scrivener, K. L., and Gariner, E. M., "Microstructural Gradients in Cement Paste around Aggregate Particles," Materials Research Symposium Proceedings, V.114, 1988.
4. Monteiro, P. J. M.; Maso, J. C., "The Aggregate-Mortar Interface," Cement and Concrete Research, V. 15, No. 16, 1985.
5. La Rue H. A. Proceedings, ASTM, No. 46, 1946.
6. И. Н. Ахвердов, А. Е. Смольский, В. В. Скочеляс. Моделирование напряженного состояния бетона и железобетона. Минск, «Наука и техника», 1973, стр. 232.
7. Cetin, A.; Carrasquillo, R. L., "High-Performance Concrete: Influence of Coarse Aggregates on Mechanical Properties," ACI Materials Journal, V 95, No. 3, May-June 1998.
8. Френкель И. М. Технологические основы и расчет состава бетона. - М., 1961.
9. Михайлов Н. В. Физико-химическая теория бетона и основные положения технологии бетона и железобетона. - М., 1985.
10. Neville, A. M., Properties of Concrete, Fourth and Final Edition, London, 1995.