

Филимонова Н.В., Кравченко В.В.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ГРАНУЛ МЕЛКОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ

Введение. Для прогнозирования физико-механических характеристик бетона необходимо располагать сведениями о свойствах его отдельных компонентов. Большинство характеристик строительных материалов (в том числе компонентов бетона) обычно определяется экспериментально и часто используется в расчетах как константы материалов. Для некоторых материалов с постоянными свойствами на основании накопленных экспериментальных сведений формируются справочные базы данных [1]. В Беларуси такие систематизированные базы данных на сегодняшний день недоступны либо отсутствуют. Это в значительной степени осложняет внедрение в процесс исследования и прогнозирования свойств бетона различных математических и имитационных моделей.

К примеру, сведения о жесткостных характеристиках некоторых заполнителей (керамзитового, перлитового песка и пр.) сложно найти даже в разобранной специальной литературе. Методология определения этих характеристик также недостаточно развита. Для большинства крупных заполнителей модуль упругости может быть определен испытанием образцов, выпиленных из массива соответствующей горной породы. В случае с керамзитовым гравием образцы могут быть выпилены из крупных зерен. Для мелкого заполнителя такие методики неприменимы.

Долгое время решение этой задачи не вызывало интерес у исследователей, поскольку того не требовали существующие методы подбора состава и прогнозирования свойств бетонов. Для составов, проектируемых с позиции экономии вяжущего, а также исходя из требуемых характеристик подвижности и прочности, имели значение в основном эмпирико-технологические параметры материалов, такие как плотность и пустотность заполнителя, активность и водопотребность цемента и пр.

Для бетонов нового поколения приобретают значение не только показатели прочности и подвижности, но и характеристики долговечности, деформативные и жесткостные свойства. Все они поддаются прогнозированию при помощи специально разрабатываемых математических и структурных моделей. Но для того, чтобы пользоваться такими моделями, необходимо иметь информацию о характеристиках отдельных компонентов бетона. Так, например, для расчета модуля упругости или деформаций усадки бетона необходимо знать модули упругости его компонентов: цементного камня и заполнителей. Что касается тяжелых крупных заполнителей, их жесткостные характеристики в основном известны, а методы их определения регламентированы. Возвращаясь к жесткостным характеристикам мелких фракций, в особенности искусственных пористых заполнителей, напомним: здесь задача остается пока нерешенной.

Необходимо отметить, что наш интерес к проблеме определения модуля упругости именно мелких фракций пористых заполнителей не случаен. Из числа последних научно обоснованных приемов управления свойствами высококачественных бетонов заслуживает внимания так называемый метод «внутреннего увлажнения». В бетонах нового поколения взамен части тяжелого заполнителя вводят пористые гранулы легкого заполнителя, предварительно насыщенного водой. Таким образом, легкий заполнитель резервирует воду, которая затем расходуется на гидратацию цемента и позволяет избежать деформаций аутогенной усадки (самовысыхания структуры). Причем наибольший эффект достигается при применении мелких гранул, равномерно распределенных по всему объему бетона.

Этот технологический прием давно практикуется за рубежом. Его преимуществам и перспективам применения в отечественной практике были посвящены наши работы [2,3]. Однако введение легкого заполнителя влияет и на прочность бетона. Спрогнозировать это влияние помогают именно модели. Но для того, чтобы их применить (в том числе и для решения других задач), необходимо пополнить базу исходных характеристик компонентов бетона новыми справочными данными или методами их получения.

В данной работе представлены некоторые результаты разработки методики определения модуля упругости гранул мелкого заполнителя.

1. Теоретические основы метода определения модуля упругости гранул мелкого заполнителя. Предлагаемый метод является расчетно-экспериментальным. В его основу заложена известная взаимосвязь между модулем упругости бетона и слагающих его компонентов. Для различных композитов подобные взаимосвязи воплощены на сегодняшний день в большом количестве самых разнообразных аналитических зависимостей, которые отражают роли жесткостей, концентраций, формы, размеров, взаимного расположения отдельных компонентов в формировании эффективных (гомогенизированных) характеристик композита.

Самым распространенным способом решения задачи о нахождении эффективного модуля упругости бетона является решение краевой задачи теории упругости, основанной на допущении о том, что структуру бетона можно моделировать регулярной укладкой идентичных включений в неограниченную матрицу [4-9]. В таких моделях в качестве включений рассматриваются зерна крупного или мелкого заполнителя, а в качестве матрицы – цементно-песчаный раствор или цементный камень (в зависимости от масштаба решаемой задачи). Задача о нахождении эффективного модуля упругости может решаться как аналитически, так и численно. При этом очевидно, что эти же подходы могут быть использованы и для решения обратной задачи, то есть, для *определения модуля упругости любого из компонентов при известном модуле упругости композита*. На этом положении и основан предлагаемый метод. В общем виде метод предполагает выполнение следующей последовательности операций:

- изготовление образцов двухкомпонентного композитного материала с известной концентрацией включений, модуль упругости которых необходимо определить;
- изготовление образцов матрицы (без включений);
- определение модуля упругости образцов композита и матрицы;
- расчет, на основании полученных экспериментальных данных, модуля упругости включений при известных модулях упругости композита и матрицы.

В расчетной части метода могут быть использованы уже существующие решения, предназначенные для определения эффективных характеристик композитных материалов [5,7-10]. В частности, при расчете модуля упругости включений нами были рассмотрены несколько подходов различных авторов:

- схема *Mori-Tanaka* [10] – базируется на методе самосогласования, позволяющем определять эффективные модули неоднородных упругих сред с учетом геометрии включений.
- *D-EMT* [11] – дифференциальная теория эффективной среды

Филимонова Наталья Викторовна, к.т.н., доцент кафедры технологии бетона и строительных материалов Брестского государственного технического университета.

Кравченко Валентин Викторович, аспирант кафедры технологии бетона и строительных материалов Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

• модель *Н.А.Рака* [5] – метод, основанный на анализе структурно-механической конечноэлементной модели бетона.

Следует отметить, что среди перечисленных подходов только схема *Mori-Tanaka* позволила нам получить решение обратной задачи в аналитическом выражении. Расчет модулей включений методами *D-EMT*, и *Н.А.Рака* выполнялся итерационно, в результате чего были получены решения только в численном виде.

Для проверки адекватности разрабатываемого метода были изготовлены контрольные образцы композита с включениями, модуль упругости которых был заранее известен. Сравнительный анализ фактических характеристик материала с результатами, получаемыми при помощи предлагаемой методики для этого же материала, позволил объективно оценить и спрогнозировать достоверность данных, которые могут быть получены для других материалов.

2. Характеристики материалов, оборудования и опытных образцов

2.1. *Материалы.* Для изготовления образцов были использованы:

- портландцемент ПЦ 500-Д0 производства ОАО Красносельскстройматериалы;
- клей эпоксидный универсальный со средней плотностью 1086 кг/м³;
- песок керамзитовый (см. таблицу 1).

Таблица 1. Характеристики керамзитового песка

Наименование материала	Фракция, мм	Плотность зёрен, кг/м ³	Насыпная плотность, кг/м ³	Пустотность, %
Песок керамзитовый	2,5 – 5	1071,74	690	35,5
	1,25 – 2,5	1030,89	790	23,3

2.2. *Опытные образцы.* Испытания проводились на образцах-цилиндрах диаметром 50 мм и длиной 100 мм, изготовленных из смеси керамзитового песка фракций 2,5..5,0 мм и эпоксидной смолы (см. табл. 2, рис. 1). Объемная концентрация включений составляла 50% в серии *K1-0,5* и 0% в серии *M0*. Выбор эпоксидной смолы в качестве матрицы (взамен традиционного цементного камня) обусловлен постоянством ее свойств во всем объеме материала. Цементный камень, выполняющий функции матрицы в цементных бетонах, лишен этого преимущества, так как он характеризуется существенными отличиями в свойствах у поверхности заполнителя (в транзитной зоне) по сравнению со свойствами в остальном объеме, что усложняет расчет гомогенизированных характеристик. Кроме того, изготовление образцов на эпоксидной смоле позволяет значительно сократить продолжительность испытаний.

Для оценки достоверности получаемых результатов были изготовлены серии контрольных образцов из цементного камня при $V/C=0,3$. Часть образцов (серия *ЦК – 1*) непосредственно подвергалась испытаниям для определения модуля упругости. Другая часть измельчалась до частиц размером 2,5-5 мм. Полученные гранулы цементного камня были использованы в качестве заполнителя с достоверно известными свойствами при изготовлении образцов композитного материала на эпоксидной смоле (серия *ЦК1 – 0,5*), аналогичных образцам с керамзитовым песком. Все образцы с цементным камнем испытывались в возрасте 7 суток твердения в нормальных условиях.

Таблица 2. Характеристики опытных образцов для определения модуля упругости

Серия	Вид заполнителя	Фракция заполнителя, мм	Объемная концентрация заполнителя	Примечание
<i>M0</i>	–	–	0	Матрица
<i>K1 – 0,5</i>	керамзитовый песок	2,5–5,0	0,5	Композит
Контрольные (проверочные) образцы				
<i>ЦК – 1</i>	–	–	–	Цементный камень как заполнитель с достоверно известными свойствами
<i>ЦК1 – 0,5</i>	дробленый цементный камень	2,5–5,0	0,5	Композит



Рис. 1. Опытные образцы серий *M0*, *K1*

Модуль упругости образцов определялся согласно ГОСТ 24452 при нагрузке, соответствующей 30% предельного уровня. Деформации образцов под нагрузкой измеряли при помощи оптического датчика перемещений, установленного вместе с образцом в специально разработанном устройстве [12].

2.3. *Устройство для измерения деформаций образца.* Общий вид устройства для определения линейных деформаций исследуемого образца под нагрузкой приведен на рисунке 2. Устройство представляет собой кондуктор, в котором фиксируется оптический датчик, измеряющий линейное перемещение с точностью 0,001 мм. Кондуктор с датчиком и исследуемым образцом устанавливается в гидравлический пресс. Показания, снимаемые датчиком, фиксируются в электронном виде на компьютере. Соответствующие им значения нагрузок регистрируются визуально с необходимой периодичностью по показаниям прессы.

3. **Результаты эксперимента и их анализ.** Основные результаты эксперимента и расчетов обобщены в таблице 3.

На основании полученных данных можно заключить: разрабатываемый метод безусловно функционирует и позволяет получать уникальные в своем роде результаты, однако, требует совершенствования. Так, обращает на себя внимание существенная для подобных

Таблица 3. Экспериментальные данные и результаты расчета

Серия	Результаты испытаний		Результаты расчета		
	Модуль упругости матрицы, E_m , МПа,	Модуль упругости композита, E_{tot} , МПа,	Модуль упругости включения, E_{agg} , МПа, согласно		
			Mori-Tanaka [7,10]	D-EMT [11]	Рак Н.А. [5]
М0	4436	–	–	–	–
K1 – 0,5	4436 *	3176	2224	1899	2148
Контрольные образцы					
ЦК – 0,5	4436 *	4838	5263	5490	5313
ЦК – 1	–	–	6988 ***		
Погрешность вычислений, %			24,7	21,4	24
* – результат, полученный при испытании образцов серии М0					
*** – модуль упругости включения, полученный испытанием «массива»					

исследований погрешность (21-25%). Вероятнее всего, она обусловлена недостаточной выверенностью экспериментальной части методики. Например, концентрация включений, принимаемая во всех образцах равной 0,5, на самом деле могла значительно отличаться, поскольку ввиду особенностей вязких свойств эпоксидной смолы в образцах могло происходить расслоение. Расчеты показали, что такая неоднородность концентрации включений в объеме образца или ее несоответствие расчетному значению может существенно повлиять на результат. Кроме того, как видно из рисунка 1, опытные образцы композитных материалов помимо матрицы и включений заполнителя содержали также третью фазу – вовлеченный воздух. Эта особенность не была учтена при расчетах, однако по всей вероятности, существенно повлияла на модуль упругости композита в опыте, в результате чего рассчитанные значения модулей упругости включений оказались занижены.

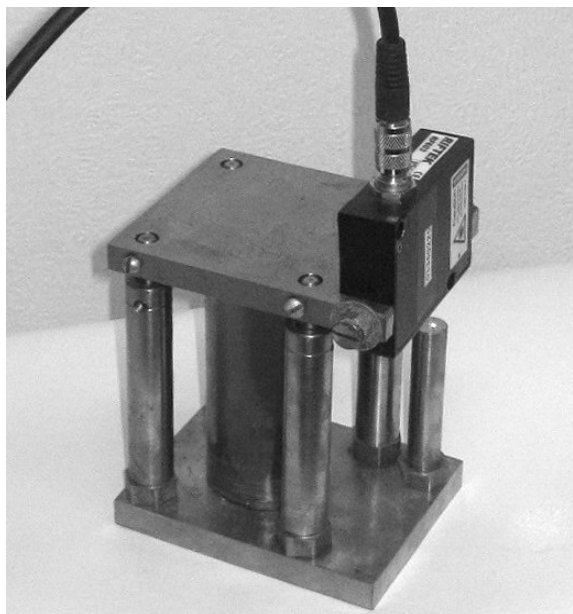


Рис. 2. Устройство для измерения деформаций образца в процессе нагружения

В целом следует отметить, как указанные замечания, так и полученные результаты имеют большое значение для дальнейшей верификации и калибровки предлагаемого метода, а также для создания общих представлений о характеристиках заполнителя и его поведении в различных матрицах.

Заключение. Развитие методологических основ получения, исследования и прогнозирования свойств высококачественных бетонов предполагает не просто привлечение современного оборудования в процесс исследования, а использование его в сочетании с

наиболее теоретическими положениями, касающимися оценки свойств композитных материалов. Предлагаемая методика является примером того, насколько важно развитие теории и эксперимента в исследовании бетона, и главное – насколько неразрывно связаны эти две стороны научно-исследовательской деятельности в строительном материаловедении.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Virtual Cement and Concrete Testing Laboratory [электронный ресурс]/Режим доступа: <http://ciks.cbt.nist.gov>. – Дата доступа 01.03.2009.
2. Кравченко В.В., Филимонова Н.В. Перспективы применения метода внутреннего увлажнения для регулирования собственных деформаций цементных систем // Вестник БрГТУ. Архитектура и строительство. – 2007 г. – №1, с.64 – 69.
3. Филимонова, Н.В. Концепция внутреннего увлажнения в технологии напрягающего бетона / Н.В.Филимонова // Проблемы современного бетона и железобетона: материалы Международного симпозиума, Минск, 16-19 октября 2007 г.: в 2 ч./ Минск, 2007.– Ч.2. – С.300-315.
4. Тур В.В. Экспериментально-теоретические основы предварительного напряжения конструкций при применении напрягающего бетона. Брест: Изд. БПИ, 1998 – 246 с.
5. Рак Н.А. Структурно-механическая модель бетона // Вестник БрГТУ. Архитектура и строительство. – 2004 г. – №1, с.234 – 239.
6. Осетинский Ю. В., Подвальный А. М. О выборе модели для расчета собственных напряжений в бетоне. // Механика композитных материалов. – М: 1982. – №5. – с. 789 –796.
7. Bernard O., Ulm F.J., Lemarchand E. A multiscale micromechanics-hydration model for the early-age elastic properties of cement-based materials // Cement and Concrete Research, Vol. 33, 2003. – pp. 1293 – 1309.
8. Wittmann, F.H. Grundlagen eines Modells zur Beschreibung charakteristischer Eigenschaften von Beton (1977), Dt. Ausschluß für Stahlbeton Heft 290
9. K. Maekawa, T. Ishida, T. Kishi. Multi-scale Modeling of Concrete Performance. Integrated Material and Structural Mechanics. Journal of Advanced Concrete Technology Vol.1, No.2, July 2003
10. L.H. Dai, Z.P.Huang, R. Wang. A Generalized Self-Consistent Mori-Tanaka Scheme for Prediction of the Effective Elastic Moduli of Hybrid Multiphase Particulate Composites/POLYMER COMPOSITES, OCTOBER 1998, Vol. 19, No. 5
11. Garboczi E. J., Berryman J. G. Elastic Moduli of a Material Containing Composite Inclusions: Effective Medium Theory and Finite Element Computations. // Mechanics of Materials, 2001. – pp. 455 – 470.
12. А.Е. Желткович. Устройство для определения модуля упругости и линейных деформаций материалов при усадке и температурных воздействиях / А.Е. Желткович, Н.В. Филимонова, А.И. Веремейчик, П.В. Фиголь, А.С. Косыко // Вестник БрГТУ. Архитектура и строительство. – 2009 (в печати).

Материал поступил в редакцию 05.03.09

The first results of working out experimentally-theoretical techniques of definition of the module of elasticity of granules of the small filler, based on application of settlement models for definition of effective characteristics of concrete are presented.

УДК 624.012.36

Санникова О.Г., Кондратчик А.А.

ФОРМИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ЭЛЕМЕНТАХ ИЗ НАПРЯГАЮЩЕГО БЕТОНА С АРМАТУРОЙ, ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОЙ КОМБИНИРОВАННЫМ СПОСОБОМ

Введение. Проектирование железобетонных конструкций из напрягающего бетона с арматурой, предварительно напряженной комбинированным способом, требует решения ряда теоретических вопросов [1, 2, 3, 4], а именно:

- как в процессе расширения напрягающего бетона будет изменяться начальная величина усилия натяжения арматуры, фиксируемая упорами;
 - как будет происходить расширение напрягающего бетона в условиях, когда на него оказывает воздействие усилие, передаваемое от предварительно напряженной арматуры.
- Оба этих процесса взаимосвязаны и будут развиваться одновременно, оказывая влияние друг на друга.

Ответы на поставленные вопросы имеют практическое значение [3], так как позволяют не только определить последовательность и условия осуществления технологических операций при изготовлении самонапряженных конструкций с арматурой, преднапряженной комбинированным способом [1], но и оценить расчетным путем полученное напряженное состояние в сечениях элемента [2].

1. Опытные образцы и методика исследований. Были проведены экспериментальные исследования конструктивных элементов из напрягающего бетона с арматурой, предварительно напряженной комбинированным способом. Опытные образцы размером 120x120x1500 мм армировались одним стержнем Ø14 S800 по СТБ 1706 ($\rho_l = 1,07\%$), располагаемым в центре сечения. Образцы отличались уровнем начальных напряжений в арматуре и видом косвенного армирования торцевых участков образцов:

- марка образца СН - $\sigma_{0,max} = 0$, арматура натягивалась физико-химическим способом при расширении напрягающего бетона, сетки косвенного армирования отсутствуют (базовые образцы);
- марка образца КНК0 - $\sigma_{0,max} / f_{po,2k} = 0,518$, арматура дополнительно деформировалась физико-химическим способом, сетки косвенного армирования отсутствуют;
- марка образца КНК40 - $\sigma_{0,max} / f_{po,2k} = 0,505$, арматура дополнительно деформировалась физико-химическим способом, сетки косвенного армирования ставились с шагом $s=40$ мм на длине 160 мм;
- марка образца КНК80 - $\sigma_{0,max} / f_{po,2k} = 0,524$, арматура дополнительно деформировалась физико-химическим способом, сетки косвенного армирования ставились с шагом $s=80$ мм на длине 160 мм.

Натяжение арматуры механическим способом выполнено гидравлическим домкратом фирмы Dycerhoff & Widmann, модель 74-113.00 (рис. 1) с последующим закреплением на упоры – торцы силовой рамы. При изготовлении опытных образцов использовались материалы, имеющие следующие характеристики, определенные при испытании:

- арматура - Ø14 S800 по СТБ 1706: относительное удлинение – 6%, временное сопротивление - 1128,2 МПа, условный предел упругости – 835,5 МПа, условный предел текучести – 982,1 МПа, начальный модуль упругости – $2,098 \cdot 10^5$ МПа;
- напрягающий бетон: состав бетонной смеси на 1 м³ 500кг: 750кг: 1150кг: 215л – напрягающий цемент (изготовлен в лаборатории БрГТУ): песок / щебень / вода. Основные характеристики напрягающего бетона (самонапряжение и прочности при сжатии) показаны на графиках, приведенных на рис. 2.

а)



б)



Рис. 1. Натяжение арматуры гидродомкратом (а) и способ закрепления на торцах силовой рамы (б)

Характеристики материалов определены по методикам СТБ 1338-2002 (напрягающий цемент), ТУ 67-938-87 (напрягающий бетон) и ГОСТ 12004-81 (арматура).

После бетонирования образцы выдерживали в воздушно-сухих условиях (1 сутки и с 29 по 113 сутки) и во влажных условиях (2-28 суток), а затем испытывали на изгиб по схеме статически определимой балки статической нагрузкой – сосредоточенной силой, приложенной в середине пролета ($l_{eff} = 1020$ мм). Перед испытанием производили передачу остаточного усилия натяжения арматуры с упоров на бетон. Деформации бетона и арматуры фиксировали при помощи переносной миссуры и электротензодатчиков.

2. Анализ изменения напряжений в арматуре на свободных участках. Согласно теоретическим исследованиям, представленным в [3], было показано, что величина предварительного напряжения на свободных участках арматуры между торцами балок и наружными

Санникова Ольга Геннадьевна, аспирант кафедры строительных конструкций Брестского государственного технического университета.

Кондратчик Александр Аркадьевич, к.т.н., профессор кафедры строительных конструкций Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Строительство и архитектура