

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Михайлов, В.В. Предварительно напряженные железобетонные конструкции: (теория, расчет, подбор сечений) / В.В. Михайлов. – М.: Стройиздат, 1978. – 383 с.
2. Пецольд, Т.М. Железобетонные конструкции. Основы теории, расчета и конструирования / Т.М. Пецольд, В.В. Тур. – Брест: Изд. БГТУ. – 2003. – 380с.
3. Тур, В.В. Экспериментально-теоретические основы предварительного напряжения конструкций при применении напрягающего бетона / В.В. Тур. – Брест: Изд. БПИ, 1998. – 246 с.
4. Кондратчик, А.А. Экспериментально-теоретические основы расчета конструкций из напрягающего бетона при совместном действии изгибающего момента, продольных и поперечных сил / А.А. Кондратчик. – Брест: Издательство БрГТУ, 2007. – 172 с.
5. Санникова, О.Г. Косвенное армирование элементов из напрягающего бетона / О.Г. Санникова, А.А. Кондратчик // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: сб. тр. XVI Международного науч.-метод. Семинара, Брест. 28-30 мая 2009 г. – Брест: БрГТУ, 2009. – Ч. 1. – С. 70-78.
6. Санникова, О.Г. Формирование напряженного состояния в элементах из напрягающего бетона с арматурой, предварительно напряженной комбинированным способом / О.Г. Санникова, А.А. Кондратчик // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2009. – № 1 (55): Строительство и архитектура. – С. 85-90.

УДК 691.32-033.33

Семенюк С.Д., Дивакова Г.А., Мамочкина М.Г., Мельянцева И.И.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КЕРАМЗИТОБЕТОНОВ КЛАССОВ 10/12,5 И 16/20

Легкие бетоны на основе керамзитового гравия широко используются в промышленном и гражданском строительстве. Керамзитобетонные конструкции позволяют улучшить теплотехнические и акустические свойства зданий, значительно снизить их массу. Комплексное использование легких бетонов позволяет решить проблемы энергоресурсосбережения при строительстве и техническом обслуживании зданий и инженерных сооружений, повысить их надежность, долговечность и безопасность при эксплуатации. Однако для соответствия белорусских нормативных документов с Еврокодом необходимо уточнить некоторые прочностные и деформативные характеристики легких бетонов, что для Республики Беларусь является актуальным. С этой целью были проведены экспериментальные исследования прочности и деформативности образцов из легкого бетона класса 10/12,5 и 16/20 в виде кубов, цилиндров и призм на кратковременное центральное сжатие в соответствии с ГОСТ 24452-80*.

Для определения прочностных и деформативных характеристик легких бетонов на основе керамзитового гравия были исследованы 2 серии опытных образцов из бетона класса 10/12,5 и 16/20. В каждой серии экспериментальных исследований было сформировано и испытано 12 кубов с размерами ребра 150 мм, 8 кубов с размерами ребра 100 мм, 12 цилиндров диаметром 150 мм и высотой 300 мм и 12 призм размерами 150×150×600 мм. Испытания проводились в возрасте 7, 14, 28 и 60 суток. В каждом возрасте испытывалось по 3 куба с размерами ребра 150 мм, 2 куба с размерами ребра 100 мм, 3 призмы размерами 150×150×600 мм и 3 цилиндра диаметром 150 мм и высотой 300 мм.

В качестве крупного заполнителя для бетона класса 16/20 использовался керамзитовый гравий фракций 5-10 мм и 10-20 мм с относительной прочностью в цилиндре 2,68 МПа и 1,86 МПа соответственно. Для изготовления легкого бетона класса 10/12,5 применялся только керамзит фракции 10-20 мм. Для обших се-

рий в качестве мелкого заполнителя служил песок кварцевый с модулем крупности $M_{кр}=1,8$, вяжущим служил портландцемент ОАО «Белорусский цементный завод» марки М 500.

Состав керамзитобетонной смеси для бетона класса 16/20: Ц:П:Г=1:1,84:0,79 при водоцементном отношении $V/Ц=0,46$. Плотность легкого бетона в возрасте 28 суток оказалась равной 1545 кг/м^3 .

Состав керамзитобетонной смеси для бетона класса 10/12,5: Ц:П:Г=1:2,41:1,37 при водоцементном отношении $V/Ц=0,51$. Плотность легкого бетона в возрасте 28 суток оказалась равной 1390 кг/м^3 .

Испытание призм на кратковременное центральное сжатие проводилось в полном соответствии с требованиями [1]. При испытании продольные деформации измерялись индикаторами часового типа с ценой деления 0,01 мм на базе 370...375 мм, установленными вдоль оси по четырем граням призм. Поперечные деформации измерялись индикаторами часового типа с ценой деления 0,001 мм на базе 110...115 мм. Продольные и поперечные деформации по каждой отдельной призме (по показаниям четырех приборов механического действия) усреднялись. При отдельных отсчетах, резко отличавшихся от среднего, эти отсчеты и соответствующие им деформации по отдельным приборам из обработки опытных деформаций исключались.

Средняя кубиковая прочность образцов в возрасте 7 суток составила 16,04 МПа; 14 суток – 18,1 МПа; 28 суток – 20,56 МПа; 60 суток – 21,47 МПа.

Средняя призмная прочность исследуемых образцов в возрасте 7 суток составила 13,11 МПа; 14 суток – 14,68 МПа; 28 суток – 16,21 МПа; 60 суток – 17,56 МПа, а коэффициенты призмной прочности – 0,82; 0,81; 0,79; 0,82 соответственно.

В [2, 3] показано, что зависимость «секущий модуль продольных деформаций – напряжение или уровень напряжений» ($E_{c-\sigma}$), ($E_{c-\eta}$) при кратковременном центральном сжатии бетонных призм до разрушения с постоянной скоростью роста напряжений с большой достоверностью описывается линейной опытно-корреляционной зависимостью (1), а непосредственно вытекающая из неё зависимость «напряжение – деформация» – корреляционной зависимостью (2) гиперболического вида:

$$E_{c(\sigma)} = \frac{\sigma}{\varepsilon_{c(\sigma)}} = E_{c(0)} [1 - \lambda_{\sigma} \cdot \eta], \quad (1)$$

$$\varepsilon_{c(\sigma)} = \frac{\sigma}{E_{fc}} = \frac{\sigma}{E_{c(0)} \left[1 - \lambda_{fc} \cdot \frac{\sigma}{fc} \right]}, \quad (2)$$

где η – уровень напряжений $\eta = \frac{\sigma}{fc}$; $E_{c(0)}$ – истинный модуль упругости бетона (секущий модуль деформаций при $\sigma = 0$); λ_{fc} – предельное значение коэффициента пластичности бетона при $\sigma = fc$.

Приведенная статистическая обработка результатов испытаний бетонных призм показала, что линейные корреляционные зависимости «секущие модули деформаций – напряжения или уровень напряжений» имеют место для поперечных и сдвиговых деформаций:

$$E_{v(\sigma)} = \frac{\sigma}{\varepsilon_{v(\sigma)}} = E_{v(0)} [\lambda_{v(fc)} \cdot \eta]; \quad (3)$$

$$\varepsilon_{v(\sigma)} = \frac{\sigma}{E_{v(\sigma)}} = \frac{\sigma}{E_{v(0)} \left[1 - \lambda_{v(f,c)} \cdot \frac{\sigma}{f_c} \right]}; \quad (4)$$

$$G_{\sigma} = \frac{\sigma}{\varepsilon_{G(\sigma)}} = \frac{\sigma}{2 \left[\varepsilon_{c(\sigma)} + \varepsilon_{v(\sigma)} \right]} = G_0 \left[1 - \lambda_{G(f,c)} \cdot \frac{\sigma}{f_c} \right]; \quad (5)$$

$$\varepsilon_{G(\sigma)} = \frac{\sigma}{G_{\sigma}} = \frac{\sigma}{G_0 \left[1 - \lambda_{G(f,c)} \cdot \frac{\sigma}{f_c} \right]}, \quad (6)$$

где $E_{v(\sigma)}, G_{\sigma}$ – секущие модули поперечных упругопластических деформаций и деформаций сдвига; $\varepsilon_{v(\sigma)}, \varepsilon_{G(\sigma)}$ – соответствующие вышеуказанным секущим модулям деформаций упругопластические поперечные деформации и деформации сдвига при сжатии; $E_{v(0)}, G_0$ – испытанные значения модулей упругих поперечных и сдвиговых деформаций; $\lambda_{v(f,c)}, \lambda_{G(f,c)}$ – коэффициенты пластичности по поперечным и сдвиговым деформациям при напряжении $\sigma = f_c$.

$$\lambda_{v(f,c)} = \frac{E_{v(0)} - E_{v(f,c)}}{E_{v(0)}}; \quad (7)$$

$$\lambda_{G(f,c)} = \frac{G_0 - G_{f,c}}{G_0}; \quad (8)$$

$$\varepsilon_{G(\sigma)} = 2 \left[\varepsilon_{c(\sigma)} + \varepsilon_{v(\sigma)} \right]. \quad (9)$$

Численные значения параметров линейных корреляционных зависимостей (1), (3), (5) устанавливаются статистическими методами линейной корреляции [4].

Наиболее простым способом первичного определения связи между двумя свойствами является способ графического изображения результатов вычислений. Откладывая по оси абсцисс данные одного свойства (напряжения), а по оси ординат соответствующие им значения другого свойства (относительные деформации ε и E'), получаем группу точек (рис. 1).

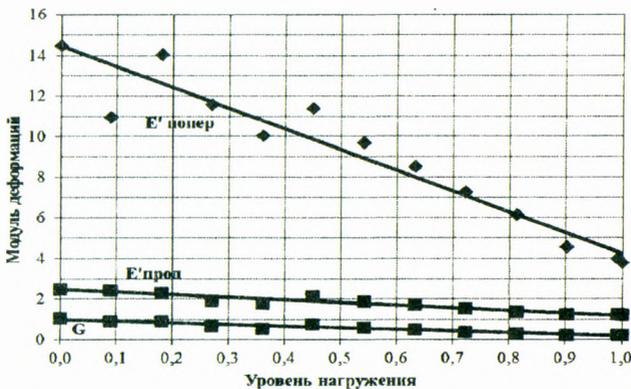


Рисунок 1 – Опытные и теоретические зависимости «Секущий модуль деформаций – уровень нагружения» для образцов из бетона класса 16/20

Величиной, выражающей прямолинейную зависимость между двумя свойствами, является коэффициент корреляции. Чем ближе коэффициент корреляции к единице, тем больше связь между изучаемыми свойствами.

Коэффициент корреляции r вычисляют по формуле:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_c \cdot Y_c)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n X_c^2 \cdot Y_c^2}}, \quad (10)$$

где $\sum_{i=1}^n (X_c \cdot Y_c)$ – отклонений отдельных вариант V_x, V_y от соответствующих им

средних арифметических M_x и M_y ;

n – число наблюдений.

Средняя ошибка коэффициента корреляции определяется по формуле:

$$m_r = \pm \frac{1-r^2}{\sqrt{n}}. \quad (11)$$

Достоверность коэффициента корреляции (линейного корреляционного уравнения или связи) оценивается отношением коэффициента корреляции r к его средней ошибке m_r . Если это отношение равно 4 или больше, то коэффициент корреляции считается достоверным и наличие связи между двумя свойствами доказано, в противном случае – нельзя сделать заключение о достоверности связи между изучаемыми свойствами.

Линейное корреляционное уравнение представлено следующей формулой:

$$Y = M_y + r \cdot \frac{\sigma_y}{\sigma_x} (X - M_x), \quad (12)$$

где σ_x, σ_y – средние квадратические отклонения.

Статистика линейных корреляционных зависимостей по усредненным показателям для испытанных призм показала, что достоверность линейности корреляционных зависимостей довольно высока (коэффициент корреляции r_x близок к единице, а его достоверность r/m_r значительно больше четырёх).

Результаты проведенных исследований отражены в табл. 1.

Таблица 1 – Характеристика бетона испытанных образцов и статистика их линейных корреляционных зависимостей для класса 16/20

Класс бетона	Возраст, сут	$f_{с, куб. МПа}$	$f_{сж, МПа}$	$f_{сж, сж}$		$f_{сж, сж}$		Зависимость	Уравнение, МПа	r	r/m_r
				η	МПа	η	МПа				
16/20	7	16,04	13,11	0,857	11,24	0,538	7,06	$E_{с(а)-\eta}$	1,795(1-0,023σ)	-0,9883	147,5
								$E_{с(а)-\eta}$	17,580(1-0,073σ)	-0,7921	7,36
								$G_{с-\eta}$	0,808(1-0,034σ)	-0,9756	70,18
								$E_{с(а)-\eta}$	2,4884(1-0,035σ)	-0,9523	42,16
	14	18,1	14,68	0,812	11,92	0,531	7,8	$E_{с(а)-\eta}$	14,474(1-0,048σ)	-0,9482	37,71
								$G_{с-\eta}$	1,066(1-0,038σ)	-0,9602	50,77
								$E_{с(а)-\eta}$	1,687(1-0,014σ)	-0,9397	43,77
								$E_{с(а)-\eta}$	16,224(1-0,05σ)	-0,9357	60,2
	28	20,56	16,21	0,776	12,58	0,505	8,18	$G_{с-\eta}$	0,843(1-0,026σ)	-0,9874	162,3
								$E_{с(а)-\eta}$	1,749(1-0,014σ)	-0,9458	39,11
								$E_{с(а)-\eta}$	13,264(1-0,041σ)	-0,8479	13,15
								$G_{с-\eta}$	1,205(1-0,022σ)	-0,9751	84,26
60	21,47	17,56	0,755	13,25	0,459	8,06	$E_{с(а)-\eta}$	13,264(1-0,041σ)	-0,8479	13,15	
							$G_{с-\eta}$	1,205(1-0,022σ)	-0,9751	84,26	

При нагружении бетонного образца длительным напряжением, меньшим либо равным нижней границе микротрещинообразования, в бетоне не возникает

микроразрушения. При действии напряжений в пределах границ нижнего и верхнего микротрещинообразований в бетоне возникают микроразрушения, но их количество не приводит к разрушению материала. Если длительное напряжение больше верхней границы микротрещинообразования, в бетоне происходит накопление и развитие микроразрушений вплоть до его полного разрушения. Поэтому за предел прочности при длительном сжатии принимают напряжение несколько ниже верхней границы микротрещинообразования (рис. 2).

Верхний предел микротрещинообразования f_{cr}^v (т. н. «критическая» граница, при достижении которой наблюдается активный прирост пластических деформаций) находился графическим методом по усреднённым экспериментальным данным для двух призм, испытанных кратковременным нагружением по стандартной методике – путём построения зависимости «уровень нагружения – объёмная деформация». Объёмные деформации при этом определялись по формуле

$$\varepsilon^v = \varepsilon_{c(\sigma)} - 2\varepsilon_{v(\sigma)}, \quad (13)$$

где $\varepsilon_{c(\sigma)}$ – продольные относительные деформации, $\varepsilon_{v(\sigma)}$ – поперечные относительные деформации.

По пиковой точке диаграммы ε^v - η находился верхний предел микротрещинообразования бетона – f_{cr}^v .

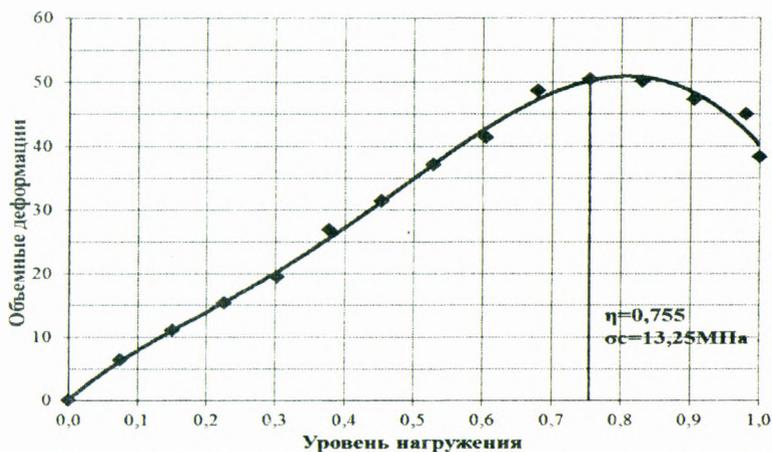


Рисунок 2 – Корреляционные зависимости «уровень нагружения-объёмные деформации» для образцов из бетона класса 16/20 в возрасте 60 суток

Определение нижнего предела микротрещинообразования f_{cr}^0 также производилось графическим методом по экспериментальным данным. Сначала по опытным данным была построена зависимость «уровень нагружения η – коэффициент Пуассона ν », при этом коэффициент Пуассона определялся как отношение поперечных относительных деформаций к продольным или как отношение поперечного модуля деформаций к продольному для каждой ступени нагружения (рис. 3).

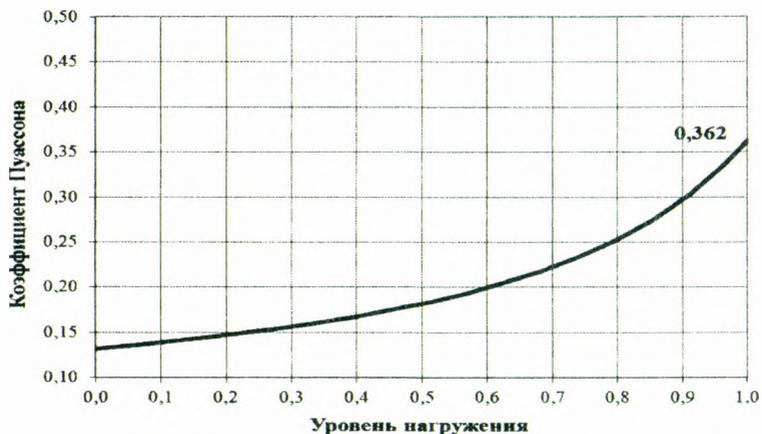


Рисунок 3 – Корреляционные зависимости «уровень нагружения-коэффициент Пуассона» для образцов из бетона класса 16/20 в возрасте 60 суток

Путём нахождения первой $\frac{dv}{d\eta}$ и второй $\frac{dv^2}{d\eta^2}$ производных был графически определён предел нижнего микротрещинообразования бетона (рис. 4).

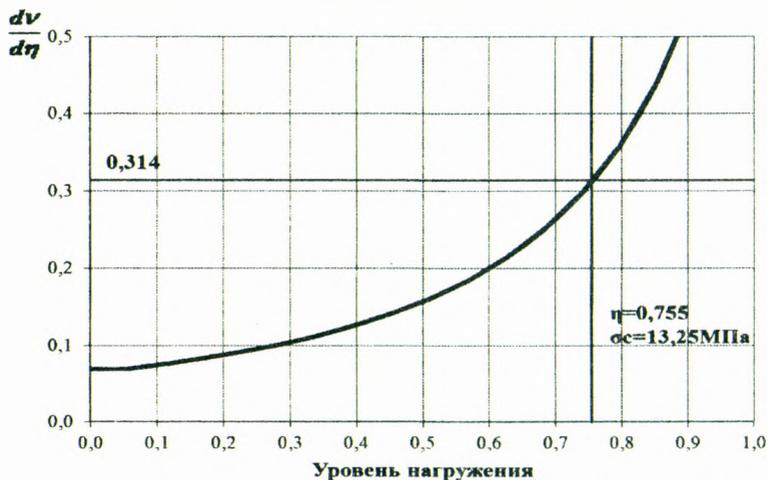


Рисунок 4 – Корреляционные зависимости «первая производная» для образцов из бетона класса 16/20 в возрасте 60 суток

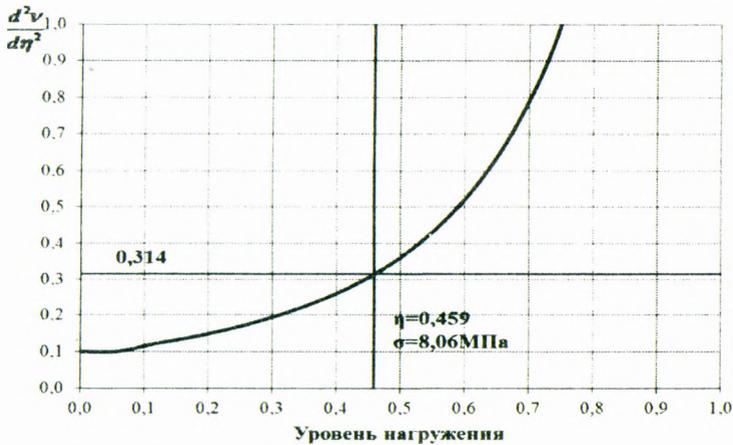


Рисунок 5 – Корреляционные зависимости «вторая производная» для образцов из бетона класса 16/20 в возрасте 60 суток

Полученные данные можно использовать при прогнозировании работы керамзитожелезобетонных конструкций, зданий и сооружений, работающих в условиях как элементарного, так и сложного деформирования. В этой связи для образцов из керамзитобетона класса 16/20 и 10/12,5 были определены следующие характеристики: кубиковая и призмная прочности, модули продольных и поперечных деформаций, модуль сдвига, объемные деформации, коэффициент Пуассона, пределы верхнего и нижнего микротрещинообразования.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бетоны. Методы определения призмной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона: ГОСТ 24452-80 / Госкомитет СССР по делам строительства. – М., 1981. – 20 с.
2. Семенюк, С.Д. К определению модуля упругости и упругопластических характеристик бетона при кратковременном центральном сжатии // Вестн. БГТУ. – 2001. – №1. Строительство и архитектура. – С. 40-44.
3. Семенюк, С.Д. Железобетонные пространственные фундаменты жилых и гражданских зданий на неравномерно деформируемом основании: монография / С.Д.Семенюк – Могилёв: Белорус.-Рос. ун, 2003. – 269 с.
4. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е.Гмурман – М.: Высш. шк., 1977. – 479 с.

УДК 693.54:624.016

Семко А.В., Гукасян О.М.

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ БЕТОНИРОВАНИЯ ТРУБОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ИХ НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ

Постановка проблемы. В последние 50 лет в Украине активно проводятся исследования трубобетонных конструкций. В настоящее время изучены особенности работы трубобетонных элементов в зависимости от их геометрических характеристик, физико-механических свойств бетона ядра и материала оболочки,