

УДК 691.32-033.33

**ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ КЕРАМЗИТОБЕТОНА  
КЛАССОВ 10/12,5 И 16/20 ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ**

**МІЦНІСТЬ І ДЕФОРМАТИВНОСТЬ КЕРАМЗИТОБЕТОНУ КЛАСІВ  
10/12,5 І 16/20 ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ВИПРОБУВАНЬ**

**STRENGTH AND DEFORMABILITY CLAYDITE-CONCRETE OF  
CLASSES 10/12,5 AND 16/20 ACCORDING TO TEST RESULTS**

Семенюк С.Д., д.т.н., зав. кафедрой, Мельянцова И.И., аспирантка, Дивакова Г.А., студентка, Мамочкина М.Г, студентка (Белорусско-Российский университет, г. Могилев).

Семенюк С.Д., д.т.н., зав. кафедрой, Мельянцова І.І., аспірантка, Дівакова Г.А., студентка, Мамочкіна М.Г, студентка (Білорусько-Російський університет, м. Могилів).

Semeniuk S.D, Doctor of Engineering, Head of Department, Melyantsova I.I, post-graduate student, Divakova G.A., student, Mamochkina M.G., student (Belarusian-Russian University, Mogilev).

В статье приведены результаты экспериментальных исследований прочностных и деформативных характеристик керамзитобетона классов 10/12,5 и 16/20 при кратковременном центральном сжатии в возрасте 7,14,28 и 60 суток, описана кинетика роста этих бетонов.

У статті наведено результати експериментальних досліджень міцнісних і деформативних характеристик керамзитобетону класів 10/12,5 і 16/20 при короткочасному центральному стисканні у віці 7,14,28 і 60 діб, описана кінетика росту цих бетонів.

The article presents the results of experimental researches of the strength and deformation characteristics of claydite-concrete of class 10/12,5 and 16/20 during short-term axial compression at the age of 7,14,28,60 days, describes the kinetics of growth of these concrete.

**Ключевые слова:**

Бетон, керамзит, прочность, деформативность.

Бетон, керамзит, міцність, деформативність.

Concrete, claydite, strenght, deformability.

Бетон и железобетон в различных его модификациях есть и в перспективе будет одним из основных строительных материалов. Легкие бетоны средней прочности на основе керамзита широко применяются в промышленном и гражданском строительстве. 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 образцов из легкого бетона класса 10/12,5 и 16/20 в виде кубов, цилиндров и призм на кратковременное центральное сжатие в соответствии с [1].

#### **Характеристика опытных образцов**

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 заформовано и испытано 12 кубов с размерами ребра 150мм, 8 кубов с размерами ребра 100мм, 8 цилиндров диаметром 150 мм и высотой 300мм и 8 призм размерами 150×150×600мм. Испытания проводились в возрасте 7, 14, 28 и 60 суток. В каждом возрасте испытывалось по 3 куба с размерами ребра 150мм, 3 куба с размерами ребра 100мм, 2 призмы размерами 150×150×600мм и 2 цилиндра диаметром 150 мм и высотой 300мм.

Нами для выявления прочностных и деформативных характеристик легких бетонов класса 16/20 использовался керамзитовый гравий фракций 5-10 мм и 10-20мм в качестве крупного заполнителя с относительной прочностью в цилиндре 2,68МПа и 1,86 МПа соответственно. Для изготовления легкого бетона класса 10/12,5 применялся только керамзит фракции 10-20 мм. Для обеих серий 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<sup>3</sup>.

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<sup>3</sup>.

Бетонную смесь приготавливали в лабораторных условиях вручную. Для изготовления образцов использовались инвентарные металлические сборно-разборные формы. Распалубливание проводилось на шестые сутки. В дальнейшем, экспериментальные образцы находились в естественных

температурно-влажностных условиях лаборатории, где и проводилось их испытание на кратковременное действие нагрузки.

Испытание призм на кратковременное центральное сжатие проводилось в полном соответствии с требованиями [1]. Нагружение призм образцов до их разрушения производилось с постоянной скоростью роста напряжений  $(0,6 \pm 0,2 \text{ МПа/с})$  ступенями, равными 10% от ожидаемой разрушающей нагрузки. При испытании продольные деформации измерялись индикаторами часового типа с ценой деления 0,01мм на базе 370...375мм, установленными вдоль оси по четырем граням призм. Поперечные деформации измерялись индикаторами часового типа с ценой деления 0,001мм на базе 110..115мм. Продольные и поперечные деформации по каждой отдельной призме (по показаниям четырех приборов механического действия) усреднялись. При отдельных отчетах, резко отличавшихся от среднего, эти отчеты и соответствующие им деформации по отдельным приборам из обработки опытных деформаций исключались.

Анализ экспериментальных данных позволил описать кинетику роста бетонов во времени гиперболической зависимостью  $R_{28} = R_t \cdot (5.6 + 0.8 \cdot t) / t$ , при этом отклонение экспериментальных данных от предложенной зависимости не превышает 3%.

#### **Экспериментально-статистическая оценка деформативных характеристик бетонов исследуемых классов**

В работах [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 большей достоверностью описывается линейной опытно-корреляционной зависимостью (1), а непосредственно вытекающая из нее зависимость «напряжение-деформация» – корреляционной зависимостью (2) гиперболического вида:

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

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

где  $\eta$  – уровень напряжений,  $E_{c(0)}$  – истинный модуль упругости бетона (секущий модуль деформации при  $\sigma=0$ );  $\lambda_{fc}$  – предельное значение коэффициента пластичности бетона при  $\sigma=f_c$ .

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

$$E_{V(\sigma)} = \frac{\sigma}{\varepsilon_{V(\sigma)}} = E_{V(0)} \cdot [1 - \lambda_{V(fc)} \cdot \eta] \quad (3)$$

$$\varepsilon_{V(\sigma)} = \frac{\sigma}{E'_{V(\sigma)}} = \frac{\sigma}{E_{V(0)} \left[ 1 - \lambda_{V(fc)} \frac{\sigma}{f_c} \right]}; \quad (4)$$

$$G_{\sigma} = \frac{\sigma}{\varepsilon_{G(\sigma)}} = \frac{\sigma}{2[\varepsilon_{c(\sigma)} + \varepsilon_{V(\sigma)}]} = G_{(0)} \left[ 1 - \lambda_{Gfc} \frac{\sigma}{f_c} \right]; \quad (5)$$

$$\varepsilon_{G(\sigma)} = \frac{\sigma}{G(\sigma)} = \frac{\sigma}{G_0 \left[ 1 - \lambda_{G(fc)} \frac{\sigma}{f_c} \right]}; \quad (6)$$

$$\varepsilon_{G(\sigma)} = 2 \cdot [\varepsilon_{c(\sigma)} + \varepsilon_{V(\sigma)}]. \quad (7)$$

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;  $\lambda_{V(fc)}$ ,  $\lambda_{G(fc)}$  – коэффициенты пластичности по поперечным и сдвиговым деформациям при напряжении  $\sigma=f_c$ .

Численные значения параметров линейных корреляционных зависимостей (1), (3), (5) устанавливаются статистически методами линейной корреляции.

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:

$$r = \frac{\sum_1^n (X_c \cdot Y_c)}{\sqrt{\sum_1^n X_c^2 \cdot Y_c^2}}, \quad (8)$$

где  $\sum_1^n (X_c \cdot Y_c)$  – отклонений отдельных вариантов  $V_x$ ,  $V_y$  от соответствующих им средних арифметических  $M_x$  и  $M_y$ ;  $n$  – число наблюдений.

Средняя ошибка коэффициента корреляции определяется по формуле:

$$m_r = \pm \frac{1 - r^2}{\sqrt{n}}. \quad (9)$$

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:

$$Y = M_y + r \cdot \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \cdot (X - M_x), \quad (10)$$

где  $\sigma_x, \sigma_y$  – средние квадратические отклонения.

По результатам обработки опытных данных, полученных при испытании призмных образцов, построены диаграммы зависимостей «секущий модуль деформаций – уровень нагружения». На рисунке 1 изображена зависимость «секущий модуль деформаций – уровень нагружения» для образцов из бетона класса 10/12,5 в возрасте 60 суток. На рисунке 2 – зависимость «секущий модуль деформаций – уровень нагружения» для образцов из бетона класса 16/20 в возрасте 14 суток.

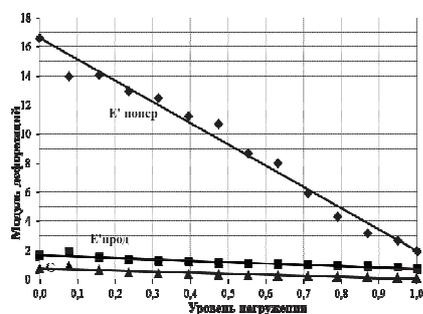


Рис.1. Опытные и теоретические зависимости «секущий модуль деформаций – уровень нагружения» для образцов в возрасте 60 суток из бетона класса 10/12,5

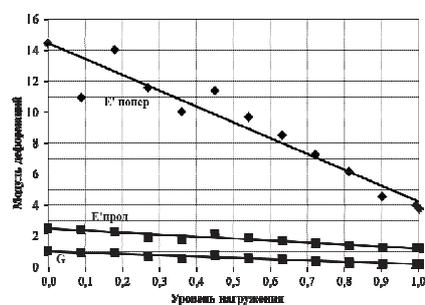


Рис.2. Опытные и теоретические зависимости «секущий модуль деформаций – уровень нагружения» для образцов в возрасте 14 суток из бетона класса 16/20

Статистика линейных корреляционных зависимостей по усредненным показателям для испытанных призм показала, что достоверность линейности довольно высока, т.е. коэффициент корреляции близок к единице, а его достоверность значительно больше четырех.

Результаты проведенных исследований для образцов из бетона класса 16/20 отражены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики бетонов испытанных образцов и статистика их линейных корреляционных зависимостей

Класс бетона	Возраст, сут	$f_{c, cube}^G$ , МПа	$f_{ck}$ , МПа	$f_{c, cube}^G$		$f_{c, cube}^G$		$f_{c, cube}^G$	Зависимость	Уравнение, МПа	$r$	$r/m_r$
				$\eta$	МПа	$\eta$	МПа					
16/20	7	16,04	13,11	0,857	11,24	0,538	7,06	$E_{c(e)-1}$	$E_{c(e)-1}$	1,795(1-0,023 $\sigma$ )	-0,9883	147,5
								$E_{c(e)-1}$	$E_{c(e)-1}$	17,580(1-0,073 $\sigma$ )	-0,7921	7,36
								$G_c-1$	$G_c-1$	0,808 (1-0,034 $\sigma$ )	-0,9756	70,18
	14	18,1	14,68	0,812	11,92	0,531	7,8	$E_{c(e)-1}$	$E_{c(e)-1}$	2,4884(1-0,035 $\sigma$ )	-0,9523	42,16
								$E_{c(e)-1}$	$E_{c(e)-1}$	14,474(1-0,048 $\sigma$ )	-0,9482	37,71
								$G_c-1$	$G_c-1$	1,066(1-0,038 $\sigma$ )	-0,9602	50,77
	28	20,56	16,21	0,776	12,58	0,505	8,18	$E_{c(e)-1}$	$E_{c(e)-1}$	1,687 (1-0,014 $\sigma$ )	-0,9397	43,77
								$E_{c(e)-1}$	$E_{c(e)-1}$	16,224(1-0,05 $\sigma$ )	-0,9357	60,2
								$G_c-1$	$G_c-1$	0,843(1-0,026 $\sigma$ )	-0,9874	162,34
	60	21,47	17,56	0,755	13,25	0,459	8,06	$E_{c(e)-1}$	$E_{c(e)-1}$	1,749(1-0,014 $\sigma$ )	-0,9458	39,11
								$E_{c(e)-1}$	$E_{c(e)-1}$	13,264(1-0,041 $\sigma$ )	-0,8479	13,15
								$G_c-1$	$G_c-1$	1,205(1-0,022 $\sigma$ )	-0,9751	84,26

В таблице 2 отображены результаты исследований для образцов из бетона класса 10/12,5.

Таблица 2  
Характеристики бетонов испытанных образцов и статистика их линейных корреляционных зависимостей

Класс бетона	Возраст, сут	$f_{c, cube}^c$ , МПа	$f_{ck}$ , МПа	$f_{ctc}^v$		$f_{ctc}^u$		Зависимость	Уравнение, МПа	$\gamma$	$\gamma/m_t$
				$\eta$	МПа	$\eta$	МПа				
10/12,5	7	8,92	7,12	0,75	5,34	0,495	3,52	$E_{c(t)}-11$	$0,964(1-0,055\sigma)$	-0,8647	16,069
								$E_{x(t)}-11$	$7,026(1-0,115\sigma)$	-0,9632	62,588
								$G_c-11$	$0,430(1-0,07\sigma)$	-0,9167	26,961
	14	10,11	8,27	0,789	6,53	0,492	4,07	$E_{c(t)}-11$	$1,315(1-0,051\sigma)$	-0,9570	128,11
								$E_{x(t)}-11$	$13,420(1-0,099\sigma)$	-0,9242	26,77
								$G_c-11$	$0,604(1-0,062\sigma)$	-0,9804	52,46
	28	11,82	9,89	0,779	7,70	0,477	4,72	$E_{c(t)}-11$	$1,251(1-0,043\sigma)$	-0,9757	81,418
								$E_{x(t)}-11$	$9,180(1-0,087\sigma)$	-0,9572	45,76
								$G_c-11$	$0,560(1-0,055\sigma)$	-0,9835	120,45
	60	13,61	11,17	0,791	8,84	0,514	5,74	$E_{c(t)}-11$	$1,643(1-0,051\sigma)$	-0,9146	23,72
								$E_{x(t)}-11$	$16,63(1-0,079\sigma)$	-0,9860	150,08
								$G_c-11$	$0,762(1-0,056\sigma)$	-0,9600	52,00

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 микротрещинообразования в бетонной матрице 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 разрушения.

Верхний предел микротрещинообразования  $f_{\text{срс}}^V$  определялся графически путем построения по экспериментальным данным зависимости «объемная деформация – уровень нагружения». По пиковой точке диаграммы  $\varepsilon^V-\eta$  находился верхний предел микротрещинообразования  $f_{\text{срс}}^V$  (рис.3).

Определение нижнего предела микротрещинообразования  $f_{\text{срс}}^0$  также выполнялось графически по экспериментальным данным. Сначала строилась зависимость «уровень нагружения – коэффициент Пуассона», при этом коэффициент Пуассона определялся как отношение поперечных относительных деформаций к продольным (рис.4).

Путем нахождения первой  $\frac{dv}{d\eta}$  и второй  $\frac{d^2v}{d\eta^2}$  производных был графически определен предел нижнего микротрещинообразования (рис.5,6).

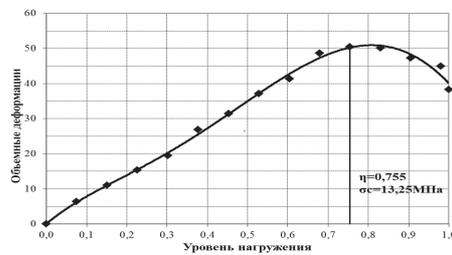


Рис. 3. Корреляционные зависимости «уровень нагружения-объемные деформации» для образцов из бетона класса 16/20 в возрасте 60 суток

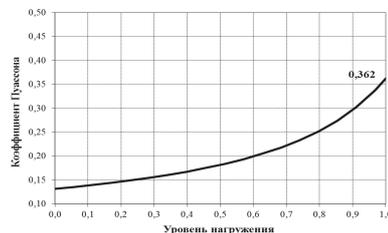


Рис. 4. Корреляционные зависимости «уровень нагружения-коэффициент Пуассона» для образцов из бетона класса 16/20 в возрасте 60 суток

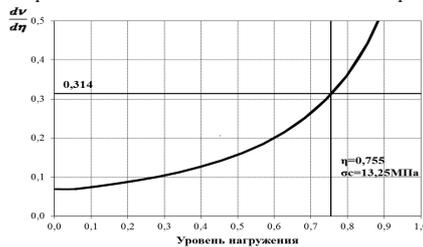


Рис. 5. Корреляционные зависимости первая производная для образцов из бетона класса 16/20 в возрасте 60 суток

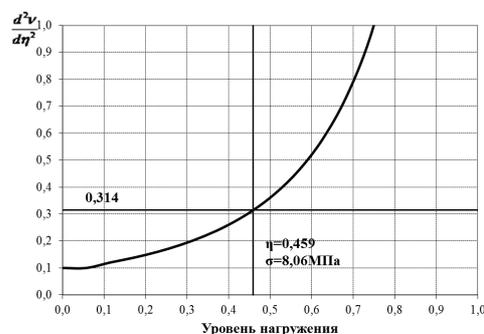


Рис. 6. Корреляционные зависимости вторая производная для образцов из бетона класса 16/20 в возрасте 60 суток

### Заключение

Полученные данные можно использовать при прогнозировании работы керамзитожелезобетонных конструкций, зданий и сооружений, работающих в условиях как элементарного, так и сложного деформирования. Кинетику роста керамзитобетонов можно описать гиперболической зависимостью, позволяющей проектировщикам определять прочностные характеристики, необходимые для расчета конструкций. 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.

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