

ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ КЕРАМЗИТОБЕТОНОВ НА ОСНОВЕ СЫРЬЯ ЗАВОДОВ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

КЕТНЕР Э. А., СЕМЕНЮК С. Д.
Белорусско-Российский университет
Могилев, Беларусь

Введение. Бетон и железобетон в различных его модификациях есть и в дальнейшем будет одним из основных строительных материалов. Одной из разновидностей бетона является керамзитобетон, относящийся к разряду легких бетонов при плотности 800–2000 кг/м³ [1]. Для соответствия белорусских нормативных документов Еврокоду необходимо уточнить некоторые прочностные и деформативные характеристики легких бетонов, что является актуальным для Республики Беларусь. В этой связи были проведены экспериментально-теоретические исследования прочности и деформативности керамзитобетонов шести серий, классов LC 8/10 ... 30/33. Для каждой серии образцов проводилось испытание кубов, призм и цилиндров на кратковременное центральное.

Материалы для бетонов. В исследованиях использовались материалы со следующими характеристиками, возможное изменение которых приводится дополнительно для конкретных экспериментов.

Вязущее – портландцемент марки М500, Белорусский цементный завод, активностью не менее 49,0 МПа, с показателем нормальной плотности (НГ) 25–28 %.

Песок – природный с модулем упругости $M_{кр} = 1,8$; насыпной плотностью – 1540 кг/м³.

Керамзитовый гравий фракций 5-10 мм, насыпной массой 382 кг/м³ с относительной прочностью в цилиндре – 2,68 МПа.

Керамзитовый гравий фракций 10-20 мм, насыпной массой 326 кг/м³ с относительной плотностью в цилиндре – 1,86 МПа.

Песок керамзитовый фракций 0-4 мм, насыпной массой 432 кг/м³ с относительной прочностью в цилиндре – 4,58 МПа.

Керамзит щебнеподобный фракций 5-10мм Петриковского керамзитового завода ОАО «Гомельский ДСК», насыпной массой 585 кг/м³ с относительной прочностью в цилиндре – 10,26 МПа.

Цель и задачи исследований. Целью исследований является получение оптимальных составов керамзитобетонов класса плотности согласно EN 206-1 при классах прочности LC 8/10 ... LC 30/33.

Для реализации этой цели решены следующие задачи: выявлена кинетика роста исследуемых бетонов во времени; найдены коэффициенты цилиндрической и призмной прочности; коэффициенты упругости и пластичности; модули продольных, поперечных и сдвиговых деформаций, касательный модуль продольных деформаций; объемные деформации, коэффициент Пуассона, пределы верхнего и нижнего микротрещинообразования.

Получение керамзитобетона LC 8/10. Для изготовления легкого бетона класса LC 8/10 в качестве крупного заполнителя использовался керамзитовый гравий фракций 5–10 и 10–20 мм с относительной прочностью в цилиндре 2,68 МПа и 1,86 МПа соответственно; в качестве мелкого заполнителя – песок керамзитовый фракции 0-4 мм ОАО «Завод керамзитового гравия г. Новолукомль». Вяжущим служил портландцемент ОАО «Белорусский цементный завод» марки 500. Состав керамзитобетонной смеси для бетона класса LC 8/10: Ц:П:Г=1:0,52:1,05 при водоцементном отношении В/Ц=0,63. Плотность бетона в возрасте 28 суток оказалась равной 950 кг/м³.

Получение керамзитобетона LC 10/12. Для изготовления легкого бетона класса LC 10/12 применялся только керамзитовый гравий фракции 10-20 мм с относительной прочностью в цилиндре 1,86 МПа. Мелким заполнителем служил песок кварцевый с модулем крупности $M_{кр}=1,8$. Вяжущим служил портландцемент ОАО «Белорусский цементный завод» марки 500.

Состав керамзитобетонной смеси для бетона класса CL 10/12: Ц:П:Г=1:2,41:1,37 при водоцементном отношении В/Ц=0,51. Осадка конуса после затворения смеси– 5 см. Плотность керамзитобетона в возрасте 28 суток – 1390 кг/м³.

Получение керамзитобетона LC 12/15. В качестве крупного заполнителя для бетона класса LC 12/15 использовался керамзитовый гравий фракций 5–10 мм и 10–20мм с относительной прочностью в цилиндре 2,68МПа и 1,86 МПа соответственно.

Мелким заполнителем 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 LC 12/15: Ц:П:Г=1:1,72:0,83 при водоцементном отношении В/Ц=0,49. Плотность керамзитобетона в возрасте 28 суток – 1490 кг/м³.

Получение керамзитобетона LC 16/18. В качестве крупного заполнителя для бетона класса LC 16/18 использовался керамзитовый гравий фракций 5–10 мм и 10–20мм в равном весовом соотношении.

Мелким заполнителем 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 LC 16/18: Ц:П:Г=1:1,84:0,78 при водоцементном отношении В/Ц=0,46. Плотность керамзитобетона в возрасте 28 суток – 1545 кг/м³.

Получение керамзитобетона LC 25/28. Состав керамзитобетонной смеси для бетона класса CL 25/28: Ц:Щ:П= 1:1,89:0,74 при водоцементном отношении В/Ц=0,42. Плотность бетона в возрасте 28 суток оказалась равной 1760 кг/м³.

Для изготовления легкого бетона класса LC 25/28 в качестве крупного заполнителя использовался керамзит щебнеподобный фракций 5–10 мм Петриковского керамзитового заводаОАО «Гомельский ДСК». Мелким заполнителем служил песок кварцевый с модулем крупности $M_{кр}=1,8$.

Состав керамзитобетонной смеси для бетона класса CL 25/28: Ц:П:Щ= 1:0,74:1,89 при водоцементном отношении В/Ц=0,52. Плотность бетона в возрасте 28 суток оказалась равной 1780 кг/м³.

Получение керамзитобетона LC 30/33. Для изготовления легкого бетона класса LC 30/33 в качестве крупного заполнителя использовался керамзит щебнеподобный фракций 5-10 мм Петриковского керамзитового заводаОАО «Гомельский ДСК», с относительной прочностью в цилиндре 10,26МПа. Мелким заполнителем служил песок кварцевый с модулем крупности $M_{кр}=1,8$.

Состав керамзитобетонной смеси для бетона класса CL 30/33: Ц:П:Щ= 1:1,84:0,79 при водоцементном отношении В/Ц=0,52. Плотность бетона в возрасте 28 суток оказалась равной 1780 кг/м³.

Составы бетонных смесей подбирались в соответствии с «Рекомендациями по подбору, изготовлению и применению конструкционно-теплоизоляционного и конструкционного керамзитобетон», подготовленных РУП «Институт БелНИИС»[4].

Методика проведения испытаний керамзитобетонных образцов. Экспериментальные исследования проводились на стандартных образцах: кубах с размером ребра 100 и 150 мм, цилиндрах диаметром 150мм и высотой 300 мм; призмах размерами 150×150×600мм и 100×100×400мм. Изготовление образцов осуществлялось в сборно-разборных инвентарных металлических формах. Для каждой серии было изготовлено и испытано: 12 кубов с размером ребра 150 мм; 10 кубов с размером ребра 100 мм; 12 цилиндров диаметром 150 мм и высотой 300 мм; 12 призм размерами 150×150×600 мм; 10 призм размерами 100×100×400 мм. Испытание проводилось в возрасте 7, 14, 28 и 60 суток для образцов класса LC8/10 ... LC25/28. Для образцов бетона серии LC30/33 испытания проводились в возрасте 14, 21, 28 и 60 суток. Испытание призм, кубов и цилиндров проводилось в полном соответствии с требованиями [2,3]. При испытании продольные деформации измерялись индикаторами часового типа с ценой деления 0,01 мм на базе 370–375мм, установленными вдоль оси по четырем сторонам образцов. Поперечные деформации измерялись индикаторами часового типа с ценой деления 0,001 мм на базе 110–115 мм.

Опытные данные позволили описать кинетику роста исследуемых классов керамзитобетона во времени гиперболической зависимостью:

$$f_{lc}^t = f_{lc}^{28} \times \frac{t}{0,85 \times t + 4,2}, \quad (1)$$

где t – возраст керамзитобетона в сутках;

f_{lc}^t – прочность керамзитобетона в возрасте t суток;

f_{lc}^{28} – прочность керамзитобетона в возрасте 28 суток.

Анализ исследований показал, что обеспеченность точности формулы (1) при отклонении теории от эксперимента в 15% составляет 98%. Коэффициент призмной прочности испытанных серий образцов в возрасте 28 суток составил 0,81; для бетонов класса

LC8/10...LC12/15 коэффициент цилиндрической прочности – 0,80; для бетонов класса LC 16/18...LC30/33 – 0,90.

3. Прочность и деформативность керамзитобетона. Прочность керамзитобетона на растяжение определялась по методике [6], предложенной проф. Н.И. Ахвердовым. При этом отмечается, что прочность при растяжении примерно в 10-12 раз меньше, чем при осевом сжатии. Мешкауска Ю.Н. для бетона на кварцевом песке предлагает использовать формулу:

$$f_{lctm} = \frac{f_{lck,cube}}{0,2f_{lck,cube} + 7,9}, \quad (2)$$

где $f_{lck,cube}$ – гарантированная прочность керамзитобетона.

ТКП EN1992-1-1-2009 [1] рекомендует предел прочности легкого бетона при растяжении определять умножением предела прочности тяжелого бетона на коэффициент:

$$\eta_1 = 0,40 + 0,60 \cdot \frac{\rho}{2200}, \quad (3)$$

где ρ – предельное значение плотности легкого бетона соответствующего класса.

На основе анализа опытных данных авторами предложена зависимость учитывающая плотность керамзитобетона ρ и его гарантированную прочность $f_{lck,cube}$.

$$f_{lctm} = 0,3 \cdot \frac{\rho}{2200} \cdot \sqrt[3]{f_{lck,cube}^2}, \quad (4)$$

Для бетонов класса LC10/12...LC30/33 среднее отклонение между ТКП EN 1992 и формулой (4) не превышает 4%(3,96), а отклонение показателей по формуле (2) составляет 10% по абсолютной величине.

Данные прочности бетона при растяжении по ТКП EN1992-1-1-2009 и формулой (2) представлены в таблице 1.

Прочность керамзитобетона при растяжении, МПа

	LC8/10	LC10/12	LC12/15	LC16/18	LC25/28	LC30/33
ТКП EN1992-1-1-2009	0,792	1,090	1,270	1,440	2,280	2,570
$f_{lcm} = 0,3 \cdot \frac{\rho}{2200} \cdot \sqrt[3]{f_{lc,cube}^2}$	0,601	0,994	1,203	1,447	2,200	2,500
% расхождения	24,1	8,8	5,3	-0,5	3,5	2,7

Прочность керамзитобетона на сжатие исследовалась в возрасте 7,14,21,28,60 суток. Наилучшую сходимости с экспериментом в возрасте 28 суток дает формула, предложенная проф. Пирадовым А.В. в зависимости от четырех переменных бетонной смеси. Эта зависимость выражается уравнением регрессии.

$$f_{lc,cube} = 10,38 \frac{C}{B} + 0,0441 \cdot t + 0,215R_y + 1,19R_z - 27,95, \quad (5)$$

где $\frac{C}{B}$ – цементно – водное отношение;

t – расход цементного теста;

R_y – активность цемента;

R_z – прочность крупного заполнителя по испытанию в стандартном цилиндре.

Мешкаускас Ю.Н аналогичную формулу получил для конструкционного керамзитобетона:

$$f_{lc,cube} = 0,051m_2 - 20,67 \frac{B}{C} + 0,651R_z - 19,32, \quad (6)$$

где m_2 – масса керамзита в 1м³ бетона.

Деформативные свойства керамзитобетона можно охарактеризовать модулем упругости, коэффициентом упругости, предельной сжимаемостью и растяжимостью. В нормативной литературе за начальный модуль упругости принимается модуль упруго-пластичности бетона (секущий модуль) при $\sigma = 0,4f_{ck}$. Связь между секущим модулем продольных деформаций и уровнем напряжений при кратковременном центральном сжатии призм до разрушения с постоянной скоростью роста напряжений с большой достоверностью описывается линейной опытно-корреляционной зависи-

мостью (7), а зависимость «уровень напряжений – деформация» зависимостью (8) гиперболического вида [7].

$$E'_{lcl(\sigma)} = \frac{\sigma}{\varepsilon_{lcl(\sigma)}} = E'_{lcl(\sigma=0)} \cdot [1 - \lambda_{lcl(\sigma)} \cdot \eta], \quad (7)$$

$$\varepsilon_{lcl(\sigma)} = \frac{\sigma}{E'_{lcl(\sigma)}} = \frac{\sigma}{E'_{lcl(\sigma)} \cdot [1 - \lambda_{lcl(\sigma)} \cdot \frac{\sigma}{f_{lck}}]}, \quad (8)$$

где η – уровень напряжений;

$E'_{lcl(\sigma=0)}$ – мгновенный модуль упругости бетона (секущий модуль деформаций при $\sigma = 0$);

$\lambda_{lcl(\sigma)}$ – предельное значение коэффициента пластичности бетона $\sigma = f_{lck}$.

Как показали исследования «секущие модули деформаций – напряжения или уровень напряжений» имеют место и для поперечных и сдвиговых деформаций:

$$E'_{lcd(\sigma)} = \frac{\sigma}{\varepsilon_{lcd(\sigma)}} = E'_{lcd(\sigma=0)} \cdot [1 - \lambda_{lcd(\sigma)} \cdot \eta], \quad (9)$$

$$\varepsilon_{lcd(\sigma)} = \frac{\sigma}{E'_{lcd(\sigma)}} = \frac{\sigma}{E'_{lcd(\sigma=0)} \cdot [1 - \lambda_{lcd(\sigma)} \cdot \frac{\sigma}{f_{lck}}]}, \quad (10)$$

$$G'_{l(\sigma)} = \frac{\sigma}{\varepsilon_{G(\sigma)}} = G'_{l(\sigma=0)} \cdot [1 - \lambda_{G(\sigma)} \cdot \frac{\sigma}{f_{lck}}], \quad (11)$$

$$\varepsilon_{G(\sigma)} = \frac{\sigma}{G'_{l(\sigma)}} = \frac{\sigma}{G'_{l(\sigma=0)} \cdot [1 - \lambda_{G(\sigma)} \cdot \eta]}. \quad (12)$$

В формулах (10) и (12)

$$\lambda_{lcl(\sigma)} = 1 - \frac{E'_{lcl(\sigma)}}{E'_{lcl(\sigma=0)}}, \quad \lambda_{G(\sigma)} = 1 - \frac{G'_{l(\sigma)}}{G'_{l(\sigma=0)}}, \quad (13)$$

Касательный модуль продольных деформаций определяется в зависимости от секущего модуля продольных деформаций:

$$E_{lcl(\sigma)} = E'_{lcl(\sigma)} \cdot \nu = \frac{(E'_{lcl(\sigma)})^2}{E'_{lcl(\sigma=0)}}, \quad (14)$$

где $\nu = \frac{E'_{lcl(\sigma)}}{E'_{lcl(\sigma=0)}}$ – коэффициент упругости бетона.

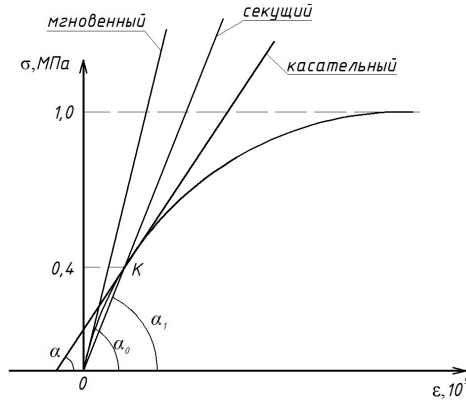


Рис. 1. Модули упругости бетона:
 $\text{tg}\alpha_0$ – мгновенный (динамический модуль);
 $\text{tg}\alpha$ – касательный модуль;
 $\text{tg}\alpha_1$ – секущий модуль

В соответствии с ТКП EN1992-1-1-2009 [1] значения секущего модуля $E'_{lcl(\sigma)}$ для легкого бетона могут быть получены умножением соответствующих значений для тяжелого бетона с обычной плотностью на коэффициент $\eta_E = \left(\frac{\rho}{2200}\right)^2$; ρ – плотность легкого бетона.

Численные значения параметров линейных корреляционных зависимостей (7), (9), (11) были установлены статистическим методом линейной корреляции [8], при обработке экспериментальных данных. Коэффициент корреляции во всех случаях был близок по абсолютной величине к 1, а его достоверность была доказана.

На рис. 2 показана зависимость «объемные деформации – уровень нагружения» для образцов из керамзитобетона класса LC 8/10 в возрасте 28 суток.

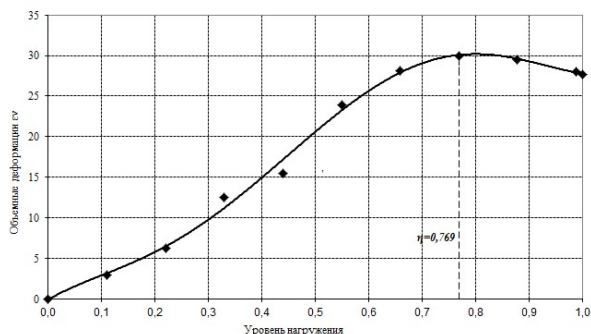


Рис. 2. Корреляционные зависимости «уровень нагружения - объемные деформации» для образцов из бетона класса LC 8/10 в возрасте 28 суток

Для назначения на конструкцию эксплуатационных нагрузок необходимо знать пределы верхнего и нижнего микротрещинообразования бетона. Верхний предел микротрещинообразования находился графическим методом по усредненным экспериментальным данным двух призм путем построения зависимости «уровень нагружения – объемная относительная деформация». Объемная деформация вычислялась по формуле

$$\varepsilon^v = \varepsilon_{lcl(\sigma)} - 2 \cdot \varepsilon_{lcl(\sigma)}. \quad (15)$$

По пиковой точке диаграммы $\varepsilon^v - \eta$ находили верхний предел микротрещинообразования f_{crc}^v керамзитобетона.

Нижний предел микротрещинообразования f_{crs}^0 также находился экспериментальным путем. При этом была построена зависимость «уровень нагружения – коэффициент Пуассона» (рис. 3.). Взяв первую и вторую производную от коэффициента Пуассона графическим путем был найден предел нижнего микротрещинообразования.

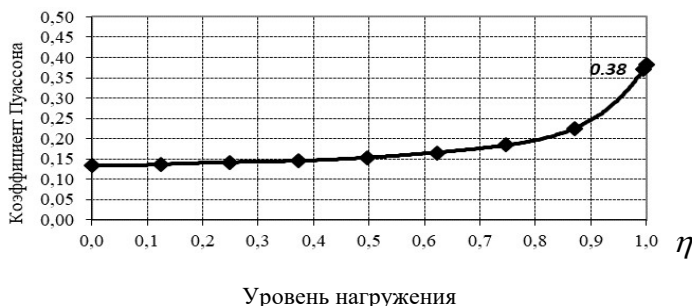


Рис. 3. Корреляционные зависимости «уровень нагружения - коэффициент Пуассона» для образцов из бетона класса LC 8/10 в возрасте 28 суток

Закключение. Анализ опытных данных испытанных шести серий керамзитобетона позволил описать кинетику роста керамзитобетона во времени гиперболической зависимостью, реально отвечающую эксперименту. Коэффициент призмной прочности в среднем можно принять равным 0,8. Коэффициент цилиндрической прочности для керамзитобетонов классов LC8/10...LC12/15 – 0,8; а для классов керамзитобетона LC16/18...LC30/33–0,9. Методом линейного корреляционного анализа вычислены модули продольных, поперечных и сдвиговых деформаций; представлена их аналитическая зависимость от прочности бетона и его уровня загрузки. Представлен касательный модуль продольных деформаций в зависимости от секущего модуля керамзитобетона. Полученные данные можно использовать при прогнозировании работы бетонных и армированных керамзитобетонных конструкций зданий и сооружений, работающих в условиях как элементарного, так и сложного деформирования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ТКП EN 1992 -1-1-2009 Еврокод 2 Проектирование железобетонных конструкций Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий. – Министерство архитектуры и строительства. – Минск., 2010.
2. ГОСТ 24452-80. Бетоны. Методы определения призмной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона. – Госкомитет СССР по делам строительства. – М., 1981 – 20 с.

3. ГОСТ 10180-2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – Министерство архитектуры и строительства. – Минск., 2012 – 40 с.

4. Рекомендации по подбору составов, изготовлению и применению модифицированных химическими и минеральными добавками конструкционно-теплоизоляционного и конструкционного керамзитобетонов/ РУП «Институт БелНИИС» – Минск, 2013. – 38 с.

5. Патент на полезную модель при измерении деформаций в бетонных цилиндрах

6. Методика проведения испытания кубов на раскалывание для определения прочности керамзитобетона на растяжение

7. Семенюк С.Д. Железобетонные пространственные фундаменты жилых и гражданских зданий на неравномерно-деформированном основании: монография / С.Д. Семенюк - Могилев: Беларус.-Рос. ун., 2003. - 269 с.

8. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман – М.: Высш. школа, 1977. – 479 с.

УДК 624.012.2

РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЯ БЕТОНА НА СМЯТИЕ (МЕСТНОЕ СЖАТИЕ)

СЕМЕНЮК С. Д., МОРОЗОВ И. В.
Белорусско-Российский университет
Могилев, Беларусь

Аннотация. На сегодняшний день в стране разработана база для расчёта железобетонных конструкций, расчётные модели имеют достаточное обоснование. Этого нельзя сказать о расчёте усиленных конструкций. Дело в том, что расчёт таких конструкций ведется без учёта влияния малоцикловых нагрузений. В данной статье мы рассмотрим влияние такого расчета на точность итоговых результатов.

В Республике Беларусь, использование лёгких бетонов при возведении несущих конструкций на сегодняшний день является достаточно перспективным направлением, особенно, с учетом постоянно