

УДК 624.012.46

Постернак А.А.

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

Кравченко С.А.

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ЛЁГКИХ БЕТОНОВ НА ПОРИСТЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЯХ

На основании проведенного натурного эксперимента по определению прочностных и деформативных характеристик легких бетонов на пористых заполнителях получены трехфакторные уравнения регрессии, на основании которых были построены линейные уравнения прочности и деформативности. Полученные уравнения позволяют осуществлять подбор составов легких бетонов с последующим использованием его в бетонных и железобетонных конструкциях.

Ключевые слова: прочность, деформативность, линейные уравнения, легкий бетон, пористые заполнители.

Постановка проблемы. В последние годы внимание сосредоточено на разработке и применении конструкций с использованием новых материалов и компонентов, обладающих улучшенными технологическими и эксплуатационными свойствами.

Известно, что одной из актуальнейших задач в деятельности строительного комплекса страны является развитие производства конкурентоспособных изделий и конструкций для жилых, гражданских и промышленных зданий. Создание конструкций сниженной материалоемкости и требуемой долговечности с одновременной разработкой ресурсосберегающих технологий их изготовления – это одно из основных направлений успешного решения указанной задачи [1].

Анализ последних исследований и публикаций. За последнее время накопилось много исследований прочности и деформаций легких бетонов и конструкций на их основе, приведены в работах М.А. Ахматова, Э.М. Бабича, В.Н. Вырового, Б.С. Комисаренко, Р.Л. Маиляна, Л.П. Орентлихера, Н.Я. Спивака, В.Г. Суханова, А.Б. Пирадова и др.

На современном уровне значительный вклад в развитие бетонов с использованием шлака и золы внесли Ш.Т. Бабаев, Е.В. Гончикова, С.А. Высокский, Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин, А.Г. Зоткин, М.Ю. Лещинский, Н.Р. Рузиев, А.В. Каляскин, и др., но ресурсосберегающие вопросы за счёт применения промышленных отходов при изготовлении пористых заполнителей и вяжущих преимущественно рассматриваются для тяжелых бетонов.

Поставленная цель исследования достигается на основе решения задачи о получении основных расчетных параметров легких бетонов на пористых заполнителях, что позволяет более точно нормировать их значения и повысить расчетную несущую способность конструктивных элементов, а также избежать недооценок их трещиностойкости и деформативности.

Постановка задачи. Поставленная цель исследования достигается на основе решения задачи о получении основных расчетных параметров легких бетонов на пористых заполнителях, что позволяет более точно нормировать их значения и повысить расчетную несущую способность конструктивных элементов, а также избежать недооценок их трещиностойкости и деформативности.

Изложение основного материала исследования. В работах [2–5] исследованы основные свойства керамзитобетона на карбонатном и кварцевом песках с применением многокомпонентных вяжущих, определены оптимальные составы для изготовления сборных и монолитных железобетонных элементов и конструкций.

Оптимальные составы и прочностные характеристики исследуемых бетонов приведены в табл. 1.

По результатам экспериментальных исследований с 95% надежностью получены квадратичные уравнения регрессий кубиковой и призмочной прочности на 28 суток керамзитобетона на многокомпонентном вяжущем и кварцевом песке, которые с учетом только значимых коэффициентов регрессии имеют вид:

$$f_{ck}(28) = 19,95 + 3,7x_1 + 1,7x_2 + 1,9x_3 + 3,0x_4 + 2,7x_1^2 + 1,2x_1x_3 - 1,4x_4^2 - 2,1x_5^2 \quad (1)$$

$$f_{cd}(28) = 18,5 + 3,3x_1 + 1,5x_2 + 1,7x_3 + 2,8x_4 + 2,5x_1^2 + 1,1x_1x_3 - 1,178x_4^2 - 1,833x_5^2 \quad (2)$$

Для упрощення квадратичних уравнений регрессии (1,2) была использована линейная зависимость вида:

$$f_{ck}(28) = 55,2 - 34,4[(B/MKB) + r] \quad (3)$$

$$f_{cd}(28) = 19,2 - 30,3[(B/MKB) + r] \quad (4)$$

В результате применения регрессионного анализа принято линейное уравнение регрессии модуля упругости керамзитобетона на кварцевом песке и многокомпонентном вяжущем, которое имеет вид:

$$E_c(28) \cdot 10^{-3} = 25,136 - 12,8[(B/MKB) + r] \quad (5)$$

Полученные данные по керамзитобетону на карбонатном песке близки с результатами для керамзитобетона на кварцевом песке и на 15–20% превышают значения модуля упругости керамзитобетона

на керамзитовых песках. На рис. 1 представлена зависимость модуля упругости от прочности.

Из рис. 1 следует заметить, что модуль упругости керамзитобетона на кварцевом песке больше, чем на карбонатном, и в среднем их значения отличаются на 10%. Пониженный модуль упругости для некоторых видов легких бетонов отмечался также и в работах других авторов.

Одним из основных факторов, влияющих на параметрические точки микротрещинообразования, являются прочность сцепления между цементным камнем и зернами заполнителя.

Из рис. 2 для линии 1 получены линейные зависимости напряжений осевого сжатия от приложенной прочности керамзитобетона (6) и (7).

$$R_{cr}^0 / f_{cd} = 0,2618 + 0,0873 \lg(f_{cd}) \quad (6)$$

$$R_{cr}^v / f_{cd} = 0,7629 + 0,0589 \lg(f_{cd}) \quad (7)$$

Таблица 1

Составы и характеристики легких бетонов

Проектная прочность, МПа	Цемент, кг/м ³	Зола, кг/м ³	Известь, кг/м ³	Крупный заполнитель, кг/м ³	Песок, кг/м ³	Вода, л	f _{ck(mп)} , МПа	f _{ck(28)} , МПа	□, кг/м ³	Примечание
Керамзитобетон на карбонатном песке										
0	250	-	-	392	472	270	-	10,6	1190	Бетон естественного твердения
5	400	-	-	267	750	250	-	19,7	1480	
20	550	-	-	152	1002	230	-	22,9	1670	
25	550	-	-	143	933	270	-	25,7	1690	
Кералитобетон на карбонатном песке										
0	250	-	-	211	1194	202	7,4	10,7	1685	Карбонатный песок Орловского месторождения
5	280	-	-	342	1025	178	11,7	19,1	1675	
20	360	-	-	325	975	192	15,4	23,7	1690	
25	455	-	-	306	919	203	20,1	25,9	1710	
Керамзитобетон на кварцевом песке и многокомпонентном вяжущем (МКВ)										
0	110	150	130	420	480	245	9,8	10,8	1320	С-3 – 0,3...0,5%, гипс – 25кг/м ³
15	120	200	150	350	430	266	13,2	16,1	1425	
20	180	150	125	440	360	275	18,6	21,9	1400	
25	240	200	150	350	280	284	25,8	28,5	1450	
Керамзитоперлитобетон на многокомпонентном вяжущем (МКВ)										
5	100	100	160	450	190	225	4,2	5,1	1120	С-3 – 0,3...0,4%, гипс – 20кг/м ³
7,5	160	150	130	440	210	240	6,3	7,4	1260	
10	190	210	130	520	350	305	8,7	10,4	1370	
12,5	210	200	150	480	475	325	11,7	13,2	1450	
Керамзитобетон на карбонатном песке и цементно-зольном вяжущем [6]										
15	250	90	-	545	572	210	14,5	16,4	1565	С-3 – 0,6%
20	300	120	-	430	725	225	17,6	20,7	1665	
25	350	150	-	505	540	245	21,2	26,6	1690	

На рис. 2 приведены данные о характеристиках деформирования призм, из которых видно, что напряжения осевого сжатия для керамзитобетона LC12/15 равно $R_{срс}^0 = (0,49-0,54) f_{cd}$ и для марки М250 – $R_{срс}^0 = (0,51-0,57) f_{cd}$. Напряжения, соответствующие началу образования магистральных трещин разрушения, очень близки к призмной прочности керамзитобетона ($R_{срс}^v = 0,9 - 0,95 f_{cd}$), что и объясняет хрупкое разрушение призм.

В настоящих исследованиях повышенные границы микротрещинообразования позволяют рекомендовать керамзитобетоны, в т. ч. и на цементно-зольном вяжущем, для конструкций.

По испытаниям на сцепление арматуры с бетоном по зависимостям: $\tau_{сц} = N / \pi d l_{зад}$; $\sigma_0 = N / A_s$, получены с 95% надежностью уравнения регрессии разрушающих напряжений сцепления $\tau_{сц}^n$ и $\tau_{сц}^{сст}$ и напряжений в арматуре в момент сдвига незагруженного конца арматуры σ_0^n , $\sigma_0^{сст}$:

$$\tau_{сц}^n = 6,884 + 0,638x_1 - 1,38x_2 - 0,242x_1^2 - 0,09x_1x_2 + 0,863x_2^2 \quad (8)$$

$$\tau_{сц}^{сст} = 8,117 + 0,837x_1 - 1,645x_2 + 0,02x_1^2 - 0,068x_1x_2 + 0,885x_2^2 \quad (9)$$

$$\sigma_0^n = 170,3 + 57,44x_1 + 103,1x_2 + 3,955x_1^2 + 29,97x_1x_2 + 29,88x_2^2 \quad (10)$$

$$\sigma_0^{сст} = 195,5 + 60,0x_1 + 129,0x_2 + 1,603x_1^2 + 31,61x_1x_2 + 36,1x_2^2 \quad (11)$$

С возрастанием прочности (класса) бетона $\tau_{сц. разр.}$ увеличивается пропорционально. Для равных длин заделки приращение $\tau_{сц. разр.}$ разное и уменьшается с увеличением заделки.

Для разной прочности керамзитобетона на многокомпонентном вяжущем пропаренного

и естественного твердения перемещения незагруженного конца, которые пропорциональны нагрузкам, разные, и находятся в таких пределах: R15 МПа – 8-12 мкм; R20 МПа – 10-15 мкм; R25 МПа – 15-20 мкм.

Опытные значения усадочных деформаций керамзитобетона естественного твердения составили $(66...90)10^{-5}$, при использовании тепловлажностной обработки усадку керамзитобетона на известняковом песке можно уменьшить на 30%.

Ползучесть пропаренного керамзитобетона на кварцевом песке выше на 18–22,6% значения ползучести керамзитобетона на карбонатном песке.

По результатам экспериментальных исследований с 95% надежностью получены квадратичные уравнения регрессии кубиковой и призмной прочности на 28 суток, керамзитоперлитобетона на многокомпонентном вяжущем и кварцевом песке, которые с учетом только значимых коэффициентов регрессии имеют вид:

$$f_{ck}(28) = 6,99 + 4,4x_1 + 1,14x_2 - 0,95x_3 + 0,45x_1x_2 - 0,46x_1^2 + 0,54x_2^2 + 0,29x_3^2 \quad (12)$$

$$f_{cd}(28) = 5,87 + 4,27x_1 + 1,14x_2 - 0,93x_3 + 0,59x_1x_2 - 0,21x_2x_3 + 0,47x_2^2 + 0,42x_3^2 \quad (13)$$

Для упрощения квадратичных уравнений регрессии (12), (13), была использована линейная зависимость вида:

$$f_{ck}(28) = 24,4 - 17,1[(В/МКВ) + r] \quad (14)$$

$$f_{cd}(28) = 23,5 - 16,8[(В/МКВ) + r] \quad (15)$$

В результате применения регрессионного анализа принято линейное уравнение регрессии модуля упругости керамзитоперлитобетона на многокомпонентном вяжущем, которое имеет вид:

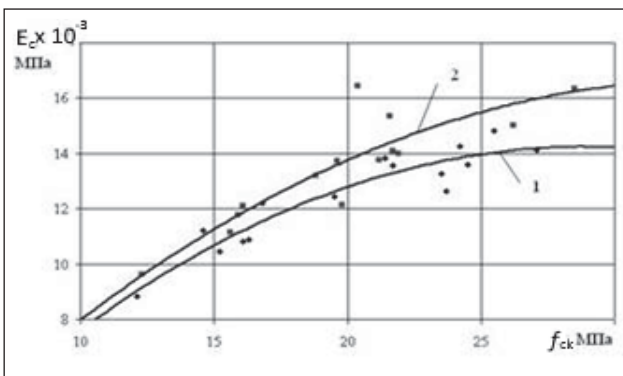


Рис. 1. Зависимость модуля упругости от кубиковой прочности:

- 1 – керамзитобетон на карбонатном песке [3];
- 2 – керамзитобетон на кварцевом песке [7].

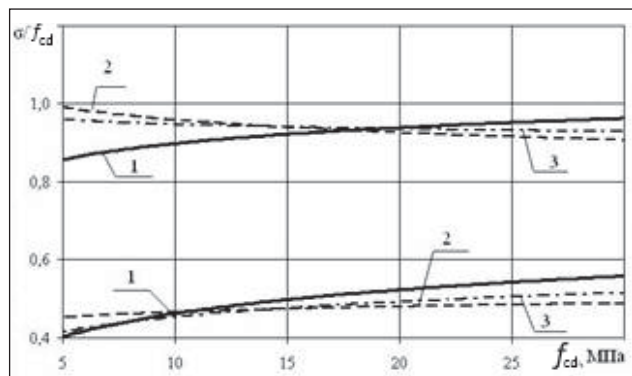


Рис. 2. Зависимость верхней и нижней границ микротрещинообразования керамзитобетона от призмной прочности:

- 1 – на карбонатном песке и цементно-зольном вяжущем [2];
- 2 – на кварцевом песке и МКВ [6]; 3 – на карбонатном песке [3].

$$E_c(28) \cdot 10^{-3} = 21,1 - 13,4[(B/MKB) + r] \quad (16)$$

По результатам экспериментальных исследований прочности свойств кералитобетона с 95% надежностью были получены квадратичные уравнения регрессий кубиковой и призмной прочностей, модуля упругости, микротрещинообразования, предельной сжимаемости, усадки, ползучести на 28 сутки, для их упрощения была исследована и линейная зависимость [6].

$$f_{cd}(28) = 41,3 - 14,7[(B/C) + r] \quad (17)$$

Для установления коэффициента призмной прочности f_b были использованы опытные значения контролируемых параметров $f_{(28)}$, $f_{cd(28)}$, что позволило методом наименьших квадратов получить уравнение регрессии:

$$\varphi_c = 0,933 + 0,0032 f_{ck} - 0,000149 f_{ck}^2 \quad (18)$$

В результате применения регрессионного анализа принято линейное уравнение регрессии модуля упругости кералитобетона, которое имеет вид:

$$E_c(28) \cdot 10^{-3} = 19,14 - 4,71[(B/C) + r] \quad (19)$$

Для определения границ области микротрещинообразования кералитобетона на карбонатном песке использовали квадратичные уравнения регрессии $R_{cr}^0(28)$ и $R_{vc}^0(28)$ в зависимости от факторов состава [7]. В результате применения регрессионного анализа для каждого из принятых возрастов кералитобетона были получены линейные уравнения регрессии вида:

$$R_{cr}^0(28) = \{0,571 - 0,064(B/C + r)\} f_{cd}; \quad (20)$$

$$R_{vc}^0(28) = \{0,982 - 0,030(B/C + r)\} f_{cd}; \quad (21)$$

Развитие во времени процесса усадки и ползучести кералитобетона достаточно достоверно может быть аппроксимировано зависимостью (22) в любой момент времени $t > 1$.

$$\varepsilon_{sc}(t, t_w) = \left[144,7 \left(\frac{B}{C} + r \right) - 73,1 \right] \cdot \left[1 - e^{-0,0101 \left(\frac{B}{C} + r \right) (t-1)} \right] \quad (22)$$

Предельное значение меры ползучести в возрасте 28 суток можно определить по линейному уравнению (23).

$$C(\infty, 28) = 1,317 \left(\frac{B}{C} + r \right)^{2,1} \quad (23)$$

Выводы. 1. Влияние указанных факторов с достаточной для практики точностью рекомендуется осуществлять, используя квадратичные уравнения регрессии для смесей и линейных уравнений для лёгкого бетона.

2. Для оптимизации составов рекомендуется использовать методику комплексного подхода, учитывающую технологические и эксплуатационные требования к бетону. Использование золы-уноса и карбонатного песка в легких бетонах является наиболее перспективным способом экономного потребления цемента и производства заполнителей.

3. Получены удобные для практического использования зависимости основных свойств (прочности и деформативности) конструкционно-теплоизоляционного керамзитобетона на многокомпонентном вяжущем прочностью 5–30 МПа

4. Легкие бетоны на пористых заполнителях юга Украины могут быть рекомендованы для изготовления бетонных и железобетонных конструкций прочностью 5–30 МПа.

Список литературы:

1. Бабич Е.М. Конструкции из легких бетонов на пористых заполнителях. Киев: Вища школа, 1988. 207 с.
2. Кравченко С.А., Постернак А.А., Костюк А.И., Столевич И.А. Свойства керамзитобетона на цементно-зольном вяжущем и карбонатном песке. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. Рівне: УДУВГП. 2014. Вип. 28. С. 54–60.
3. Костюк А.И., Столевич И.А., Кравченко С.А., Столевич О.И. Исследование свойств керамзитобетона на цементно-зольном вяжущем и карбонатном песке. Проблеми сучасного будівництва: матеріали Всеукраїнської конференції молодих вчених та студентів (Полтава, 2013). Полтава, 2013. С. 120–124.
4. Кравченко С.А., Постернак О.О. Дослідження конструкцій з керамзитобетону на цементно-зольному в'язучому. Вісник ОДАБА: зб. наук. праць. Одеса: ОДАБА. 2016. Вип. 64. С. 141–146.
5. Кравченко С.А., Постернак А.А., Костюк А.И., Столевич И.А. Модуль упругости конструкционно-теплоизоляционного керамзитобетона на многокомпонентном вяжущем. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. Рівне: УДУВГП. 2013. Вип. 25. С. 90–96.
6. Зинченко С.В., Столевич А.С., Луцкин Е.С. Прочностные и деформативные характеристики конструкционного керамзитобетона на цементно-зольном вяжущем. Будівельні конструкції: міжвід. наук.-техн. зб. наук. праць. Київ: НДІБК. 2009. Вип. 72. С. 223–231.
7. Столевич И.А., Костюк А.И. Конструктивные элементы из кералитобетона. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури: зб. наук. праць. Одеса: Зовнішрекламсервіс. 2004. Вип. 13. С. 154–159.

ОСНОВНІ ВЛАСТИВОСТІ ЛЕГКИХ БЕТОНІВ НА ПОРИСТИХ ЗАПОВНЮВАЧАХ

На основі проведеного натурного експерименту з визначення міцнісних і деформативних характеристик легких бетонів на пористих заповнювачах отримані трифакторні рівняння регресії, на основі яких були побудовані лінійні рівняння міцності і деформативності. Отримані рівняння дозволяють здійснювати підбір складів легких бетонів із подальшим використанням його у бетонних і залізобетонних конструкціях.

Ключові слова: міцність, деформативність, лінійні рівняння, легкий бетон, пористі заповнювачі.

THE MAIN PROPERTIES OF LIGHTWEIGHT CONCRETE WITH POROUS AGGREGATE

On the basis of the made natural experiment by definition strength and the deformation characteristics of lightweight concrete with porous aggregate the three-factorial equations of regression have been received, on the basis of which the linear equations of durability and deformability have been constructed. The received equations allow to carry out selection of lightweight concrete compositions with the subsequent use it in concrete and reinforced concrete designs.

Key words: durability, deformability, linear equations, lightweight concrete, porous aggregate.