

КОНСТРУКЦИОННЫЕ ЛЕГКИЕ БЕТОНЫ

Столевич А.С., Макаров С.В., Столевич И.А., Мади К.М.,
Кравченко С.А. (Одесская государственная академия
строительства и архитектуры, г.Одесса)

Приведены сведения о заполнителях, известняковом бетоне, керамзитобетоне и кералитобетоне на карбонатном песке, их свойства, конструкции из них. Технические условия, рекомендации и публикации.

Изучение тенденции развития строительных конструкций показывает, что ведущее положение в строительстве бетон и железобетон сохранит на длительную перспективу. Одним из основных направлений повышения эффективности бетона является снижение трудоемкости, материалности и плотности за счет использования дешевых и качественных местных пористых заполнителей. На юге Украины имеются достаточные залежи глин, пригодных для производства керамзита [1] и низкопробных известняков-ракушечников (карбонатные породы), при разработке которых образуется значительное количество отходов в виде песка и щебня [2].

Между тем, одним из главных девизов третьего тысячелетия является сохранение окружающей среды. Основное внимание должно быть уделено ресурсосбережению, экономии сырья и материалов, затрат труда. Последнее предопределяет стремление сохранить ресурсы природных материалов, а для этого существенно сократить или совсем исключить разработку карьеров глинистого сырья для производства керамзита (как это имеет место сейчас в странах Западной Европы), а использовать заполнители из побочных продуктов или отходов различных производств. Одним из путей решения этой проблемы может быть использован крупный пористый заполнитель – кералитовый гравий (аналог керамзиту), полученный вспучиванием при высокой температуре грунтов дноуглубления, сбрасываемых в прибрежные подводные свалки (дампинг), нарушающих биологическое равновесие в экосистеме «море-суша». В мировой практике нет опыта оптимальной переработки и рационального использования в строительстве вынутых при дноуглублении илистых грунтов.

В прошлые годы в лаборатории кафедры железобетонных и каменных конструкций ОГАСА (ОИСИ) под руководством заведующего кафедрой профессора П.Л.Еременок (его ученики Ексарев А.Д., Измайлов Ю.В., Макаров С.В., Ящук В.Е., Комышев А.В., Столевич А.С., Дорофеев В.С., Босый Ю.А. и многие другие) проводили исследования по использованию отходов камнепиления ракушечников различных месторождений, в качестве заполнителя при изготовлении бетонных и железобетонных конструкций, в том числе и предварительно напряженных. В бетонах использовались отходы крупностью 0 - 5 мм (карбонатный песок). В табл. 1 приведены характеристики известняковых (далее карбонатных) песков Одесской и Крымской областей.

Таблица 1

Месторождение песка	Прочность, МПа		Насынная плотность песка, кг/м ³	Гранулометрический состав песка						Модуль круп- ности, Мк
	камня	песка		Полные остатки на ситах, %					прошло через сито 0,14 мм	
				2,5	1,25	0,63	0,315	0,14		
Одесская обл.										
Алтестовское	1,1-1,6	2,0-2,4	1500	17,4	27,6	43,7	63,2	75,8	24,2	2,41
Булдынское	0,6-1,0	1,5-2,0	1000	18,5	29,2	47,2	64,7	79,6	20,4	2,62
Главанское	0,8-1,3	1,7-2,0	1650	14,8	37,2	56,6	65,2	81,4	18,6	2,65
Орловское	0,6-1,0	1,5-2,1	1200	11,6	23,4	50,1	69,7	87,9	22,1	2,42
Саратское	2,5-3,5	2,5-4,0	1600	19,4	29,1	47,7	62,1	76,2	23,8	2,52
Крымская обл.										
Бишераньское- 2	0,4-0,7	1,6	1200	19,6	43,2	56,0	69,4	89,2	10,8	2,77
Бишераньское- 3	0,4-1,0	3,8	1400	18,6	29,4	49,3	65,2	77,3	22,7	2,40
Евпаторийское	0,4-1,0	2,2	1400	28,0	44,0	57,0	71,5	91,5	8,5	2,92
Керченское	0,7-1,5	1,6	1250	20,1	42,3	58,0	69,6	88,8	11,2	2,79
Сакское	0,7-1,5	2,7	1400	23,0	46,0	59,2	73,1	90,6	9,4	2,92

В соответствии с программой исследований для изготовления опытных образцов элементов и конструкций применялся мелкозернистый известняковый бетон с использованием в качестве заполнителя отходов камнепиления известняка-ракушечника Булдынского (Одесская обл.) и Евпаторийского (Крымская обл.) месторождений (марка камня 4 – 10 кгс/см²).

Проведенными исследованиями [2, 3, 4] установлено, что наилучшие результаты дает пористый карбонатный заполнитель с наибольшим размером фракций до 5 мм, т.е. крупный песок. Количество пылевидных фракций менее 0,15 мм в таком песке может достигать до 20 %.

В качестве вяжущего в бетоне применялся портландцемент Николаевского завода активностью 526 кг/см², рабочие составы мелкозернистого известнякового бетона были выбраны оптимальными, путём предварительного подбора. При подборе составов бетона, помимо требования прочности, исходили из необходимой удобоукладываемости бетонной смеси. Расход воды принимали с учетом влажности заполнителя, величина которого доходила до 5 %. Бетонная смесь состояла из карбонатного песка, цемента и воды. Составы бетона по весу принимали следующие: 1 : 4,0; 1 : 4,75 и 1 : 4,75. Основные сведения о бетоне опытных образцов приведены в табл.2.

Таблица 2

№ состава бетона	Расход материалов, кг/м ³		В/Ц	γ _{об (28)} , кг/м ³	R ₂₈ , МПа	Примечание
	цемент	карбонатный песок				
1	370	1484	0,77	2140	26,4	песок Булдынского месторождения
2	320	1525	0,84	2115	21,5	----- // -----
3	335	1590	0,67	2150	25,3	песок Евпаторийского месторождения

Модули упругости мелкозернистого известнякового бетона в зависимости от кубиковой прочности могут быть определены по одной из формул [4]:

$$E_s = 11000 \sqrt{R};$$

$$E_s = \frac{550000}{1,7 + \frac{360}{R}}.$$

Размерность E_s и R в кгс/см².

Для мелкозернистого известнякового бетона прочностью $R = 150 - 300 \text{ кг/см}^2$ при нагрузках близких к разрушению значение коэффициента призмной прочности составило $0,82 - 0,90$. Коэффициент Пуассона в среднем составил $0,21$.

На основании обработки опытных данных прочность известнякового бетона при растяжении выражена зависимостью $R_p = 0,43 \sqrt[3]{R^2}$.

Опытная наибольшая величина потерь напряжений от усадки и ползучести бетона в балках, армированных стержневой арматурой класса А-IIIв при $\sigma_0/R_0 = 0,568$ составила $37,5 \%$ от величины предварительного напряжения σ_0 . Потери предварительного напряжения от усадки и ползучести мелкозернистого известнякового бетона рекомендуется определить по формулам теории старения или по методике СНиП 2.03.01-84* с учетом поправочных коэффициентов, полученных из опытов: для усадки $1,75$, для ползучести $0,7$ [9].

Кратковременные и длительные испытания предварительно напряженных балок и панелей перекрытия, армированных высокопрочной проволокой Вр-II и стержневой арматурой А-IIIв показали, что методику расчета прочности, трещиностойкости и деформативности СНиП 2.03.01-84* для тяжелых бетонов можно рекомендовать и для расчета предварительно напряженных конструкций из мелкозернистого известнякового бетона с учетом расчетных параметров, полученных на основании экспериментальных данных.

Ускоренный рост производства керамзита, как одного из наиболее эффективных искусственных крупных пористых заполнителей легких бетонов, предопределяет дальнейшее развитие и улучшение его минерально-сырьевой базы. По данным НИИ керамзита удельные затраты на сырье растут и составляют около $24,5 \%$ полной себестоимости. Использование местных хорошо вспучивающихся глин приобрело первостепенное значение. К наиболее перспективным породам для производства керамзита относятся следующие глины мезотического яруса верхнего миоцена, верхнесарматские и понтические глины неогена (Одесской, Николаевской и Херсонской областей).

Одесса до 1969 года не имела собственного керамзита. Первоначально керамзит завозили из Керчи, затем 3 – 4 года завозили керамзит из Винницы. Благодаря ректору ОИСИ профессору П.Л.Еременок (научный руководитель темы), управляющему трестом Одессельстрой В.П.Лысенко (техническая помощь), доцентам ОИСИ А.С.Столевичу (ответственный исполнитель), С.В.Макарову, аспиранту А.Н.Феофанову (исполнители темы) была сделана впервые партия ке-

рамзита на Кишиневском заводе керамзитового гравия из глин Орловского месторождения Одесской области. Партию изготовленного гравия в объеме 60 м³ было привезено из Кишинева в ОИСИ, на котором проводились исследования керамзитобетонов различного назначения (студенты Е.В.Лысенко и Л.В.Саитова выполнили научную дипломную работу в 1970 г.). В.П.Лысенко, сделал кулек из листа ватмана и насыпав в него Одесский керамзит, отвез в г.Киев Министру Сельстроя Украинской ССР. После этого были выделены ассигнования и спустя 1,5 – 2 года заработал Кулиндоровский завод керамзитового гравия треста «Сельстрой», а спустя 0,5 года керамзитовый завод треста «Одеспромстрой».

В ОГАСА (ОИСИ) бывшие аспиранты А.И.Романов, Е.В.Лысенко, В.Г.Суханов, А.И.Костюк; нынешние К.М.Мади, С.А.Кравченко, соискатели С.Зинченко и Т.Полянская (научный руководитель А.С.Столевич) проводили и проводят исследования (1974 – 2006 г.г.) свойств керамзитобетона на карбонатном песке и конструкций из него. Работы к.т.н. И.А.Столевич (научный руководитель А.И.Костюк) посвящены исследованию кералитобетона на карбонатном песке и конструкции из него (основой для производства кералита служат бросовые грунты дноуглубления). Производство кералита аналогично керамзиту. Физико-механические характеристики керамзита и кералита приведены в табл. 3.

Таблица 3

Размер фракций мм	Прочность (сдавлив. в цилиндре), $R_{ц}$, МПа	Насыпная плотность $\rho_{нас.}$, кг/м ³	Коэффициент конст- руктивного качества ККК	Удельная плотность $\rho_{уд.}$, г/см ³	Плотность в цемент- ном тесте $\rho_{цт.}$, г/см ³	Водопоглоще-ние w , %	Объем межзерновых пустот V_n , %	Содержание раско- лотых зерен, % по массе	Марка гравия по на- сыпной плотности (ГОСТ 9759-83)
керамзит									
5-10	2,8-4,67	504-583	559-801	2,31-2,48	955-1507	16,2-22,7	30-38,3	-7,3	550-600
10-20	2,4-2,91	462-541	519-538	2,31-2,48	890-1493	20,8-24,9	38-41,1	9,5-9,6	500-550
смесь	2,5-3,96	474-569	429-696	2,31-2,48	946-1502	18,2-24,1	33-40,1	9,5-9,1	–
кералит									
5-10	3,38	537	629	2,51	1100	11,2	37,8	3,2	550
10-20	2,79	349	799	2,51	975	9,8	43,2	4,4	350
смесь	3,15	462	682	2,51	1050	10,6	40,0	3,7	500

В работах [5, 6, 7, 8] исследованы основные свойства керамзитобетона и кералитобетона на карбонатном песке и назначены оптимальные составы для изготовления сборных и монолитных элементов и конструкций. Оптимальные составы керамзитобетона и кералитобетона на карбонатном песке приведены в табл.4, табл.5.

Таблица 4

Проектная прочность кг/м ²	Расход материалов на 1 м ³ бетона, кг/м ³				Прочность R_{28} , МПа	Плотность бетона $\rho_{сух.}$, кг/м ³
	цемент	песок	керамзит	вода		
50	140	440	527	225	6,5	1170
75	160	440	530	220	8,5	1185
100	180	440	530	215	11,0	1200
150	250	270	825	230	14,7	1525
200	385	250	865	230	19,9	1575
250	520	170	900	270	25,9	1685
300	580	160	865	270	31,2	1710

Таблица 5

Проектная прочность, МПа	Агрегатно-структурный фактор γ	Расход материалов на 1 м ³ бетона, кг/м ³				Плотность бетона ρ , кг/м ³
		цемент	песок	кералиит	вода	
10	0,85	250	1194	211	202	1685
15	0,75	280	1025	342	178	1675
20	0,75	360	975	325	192	1690
25	0,75	455	919	306	203	1710
30	0,75	540	870	290	210	1730

Исследовано влияние факторов состава и подвижности смеси на кубиковую и призмную прочность, плотность, модуль упругости, изменение во времени прочностных, деформативных свойств и на границы микротрещинообразования.

Положительные результаты проверки нулевой гипотезы об однородности дисперсий величин $R(28)$, $R(t)$, $R_{\sigma}(t, B/C, r)$, ρ , E_{σ} , $E_{\sigma}(t)$, $E_{\sigma}(\infty)$,

R_{crc}^o , R_{crc}^v и ε_{su} позволили при уровне значимости $\alpha = 0,05$ получить линейные уравнения регрессий:

$$R(28) = 34,5 - 10,2(B/\Omega + r);$$

$$R(t) = R(28)(\varepsilon_0 + \frac{\varepsilon_1}{t});$$

$$R_s(28) = 40 - 14,8(B/\Omega + r);$$

$$R_s(t, B/\Omega, r) = (50,1 - 16,8^{0,0133t}) - 15,9(B/\Omega + r);$$

$$\rho = 1263 + 127(B/\Omega + r);$$

$$E_s(28) \cdot 10^{-3} = 17,3 - 4,11(B/\Omega + r);$$

$$E_s(28) = 211 \cdot 10^3 \sqrt{\rho \cdot R_s(28)};$$

$$E_s(t) = E_s(\infty)(1 - e^{-\alpha t});$$

$$E_s(\infty) = 17607 - 4053(B/\Omega + r);$$

$$\alpha = 0,84 - 0,32(B/\Omega + r);$$

$$E_s(\infty) = 600 \sqrt[3]{\rho R_s(28)} + 7000;$$

$$R_{crc}^o(28) = 0,569 - 0,065(B/\Omega + r);$$

$$R_{crc}^o/R_s = 0,385 + 0,08 \lg R_s;$$

$$R_{crc}^v(28) = 0,981 - 0,029(B/\Omega + r);$$

$$R_{crc}^v/R_s = 0,859 + 0,06 \lg R_s;$$

$$\varepsilon_{su} = [189 + 84(B/\Omega + r)] \cdot 10^{-5}.$$

где: $r = \frac{M}{M + K}$ - агрегатно-структурный фактор.

Исследована усадка, ползучесть и потери предварительного напряжения от усадки и ползучести керамзитобетона на карбонатном песке.

Одной из задач исследования усадки явилось выявление характера и степени влияния рецептурных факторов на деформации усадки в зависимости от возраста керамзитобетона. Развитие во времени процесса усадки достаточно достоверно может быть аппроксимировано зависимостью:

$$\varepsilon_{sc}(t, 1) = [145,1(B/\Omega + r) - 72,8][1 - e^{-0,0101(B/\Omega + r)(t-1)}].$$

В основу методики прогнозирования деформаций ползучести керамзитобетона (кералитобетона) на карбонатном песке лежат основные зависимости наследственной теории старения.

Для вычисления значения $C(t, t_0) = C(\infty, 28) \cdot \Omega(t_0)$ надо знать предельные значения меры ползучести керамзито(кералито)бетона при нагружении в возрасте = 28 сут., которые можно вычислить по квадра-

тичному уравнению регрессии при фиксировании фактора X_3 на нулевом уровне, а также по линейному уравнению:

$$C(\infty, 28) = 1,317 [B/C + r]^{2,1}$$

Для учета особенностей ползучести этих бетонов при известном классе по прочности на сжатие B и плотности ρ параметры различных функций рекомендуется вычислять по следующим выражениям:

- параметры функций: $\Omega(t_0)$, учитывающей влияние старения бетона на меру ползучести; функции $f(t-t_0)$, учитывающей нарастание во времени меры ползучести и функции f_m , учитывающей нелинейность деформаций ползучести при кратковременном нагружении рекомендуется вычислять по следующему обобщенному выражению вида: $C, d, \delta, \gamma, V_c, m_c, V_k(28), m_k(28), V_k(t), m_k(t) = A_i \pm C_i (\rho B)^{0,333} \pm D_i (\rho B)^{0,667}$.

Аналогичного вида уравнения регрессии получены для кералитобетона на карбонатном песке с другими (иными) постоянными параметрами. Помимо этого получены зависимости, позволяющие определять указанные выше параметры при известных характеристиках составов керамзито(кералито)бетонов – расходе цемента C , воды B и значениях агрегатно-структурного фактора r .

Наиболее распространенным и доступным параметром характеризующим величины сцепления арматуры с бетоном, является средняя величина касательного напряжения сцепления $\tau_{сц}$, действующего на условной цилиндрической поверхности контакта арматуры с бетоном. В соответствии с этим были проведены эксперименты на выдергивание арматуры класса А-III и А-IIIв из керамзито(кералито)бетонных призм.

Величину $\tau_{сц}$ определяли на призмах размером 15 x 15 x 60 см из керамзито(кералито) бетона проектной прочностью 10...30 МПа. Длины заделки образцов в призмах составляли 7, 14, 21 см. Среднее условное касательное напряжение сцепления пропаренного и естественного твердения, а также в предварительно напряженных конструкциях, определяли по формуле:

$$\tau_{сц} = N_{раз} / \pi d l_f$$

Обработка результатов испытаний позволила установить ряд закономерностей:

- потерю несущей способности заделки арматуры в бетоне для всех образцов, которая произошла в результате полного нарушения сцепления и выдергивания ее из бетона;

- пропорциональное увеличение с ростом прочности керамзито (кералито) бетона разрушающего усилия $N_{раз}$;

- получение одинаковых значений $\tau_{сц} / R$ пропаренных образцов и образцов естественного твердения. Относительная величина ка-

сательных напряжений сцепления $\tau_{сц.}/R$, полученная из опыта, изменялась от 0,35 – для бетона прочностью $R = 10$ МПа, до 0,25 – для бетона прочностью $R = 30$ МПа.

Опытные значения длин зоны анкеровки определяли в момент передачи усилия предварительного напряжения на бетон. Усилие передавали ступенями по $0,25P_{01}$, с выдержкой 15 минут на каждой ступени. Статистическая обработка результатов исследования сцепления арматуры с керамзито(кералито)бетонами позволила получить линейные зависимости видов:

$$\tau_{сц.}/R = 0,8205 - 0,0193R, \quad l_{ан} = 3,0 + 7,8 \sigma_0/R_s^n.$$

Проведенные исследования и дана оценка несущей способности, трещиностойкости и деформативности конструктивных керамзитобетонных элементов, моделей и фрагментов внутренних и наружных стеновых панелей, плит перекрытия обычных и предварительно напряженных, в том числе на малоцементном известесодержащем вяжущем [9, 10, 11].

Выводы

1. Проведенные исследования, а также опыт внедрения их результатов в строительство, показали возможность применения легких бетонов на пористом мелкозернистом заполнителе не только для обычных, но и для предварительно напряженных железобетонных конструкций.

2. Применение керамзитобетона и кералитобетона на карбонатном песке в конструктивных элементах сборных и монолитных зданий позволяет при заданных технологических параметрах смеси обеспечить требуемые эксплуатационные показатели, утилизировать отходы при разработке известняковых карьеров и при дноуглублении портовых акваторий и подходных путей; выровнять экологический баланс в тех регионах, где эти бетоны являются местными строительными материалами.

3. Наибольшее влияние на основные характеристики керамзитобетона и кералитобетона – прочность, плотность, модуль упругости – оказывают факторы состава – расход цемента, объемное содержание карбонатного песка в смеси заполнителей и исходная подвижность смеси. Для практических расчетов с 95% надежностью рекомендуется использовать упрощенные линейные уравнения регрессии, связывающие указанные характеристики с обращенным фактором состава ($B/C + r$).

4. Расчет несущей способности, трещиностойкости и деформативности конструктивных элементов, в том числе и предварительно-напряженных из керамзитобетона и кералитобетона на карбонатном песке рекомендуется проводить по действующим нормам, используя уточненные значения расчетных параметров R_b , R_{bt} , $R_{b,ser}$, $R_{bt,ser}$, E_b , φ_b , ε_{bu} , ε_{sc} , ε_{cc} и потерь предварительного напряжения от усадки и ползучести.

5. По данной проблеме авторами разработано, получено и издано: Технических условий – 20, Рекомендаций и обзорных информационных – 7, авторских свидетельств – 5 и более 160 научных статей.

Литература

1. Каленов Е.М. Повышение качества керамзита. – К.:Будівельник., 1984 – 64 с., ил. – Библиогр.: с.61-62.
2. Еременок П.Л. Комплексное использование пыльных известняков в строительстве. Доклад по опубликованным работам на соискание ученой степени доктора технических наук. – Одесса, 1966. – 99 с.
3. Маилян Р.Л. Бетон на карбонатных заполнителях. - Изд-во Ростовского университета, 1967. – 272 с.
4. Столевич А.С.. Исследование прочности, трещиностойкости и деформативности предварительно напряженных изгибаемых элементов и конструкций из мелкозернистого бетона на пористом известняковом заполнителе. Дис.... канд.техн.наук. – Одесса, 1968. – 172 с.
5. Романов А.И. Экспериментальное исследование усадки, ползучести и потерь напряжения в арматуре элементов из керамзитобетона на известняковом песке. Дис.... канд. техн. наук. – Киев, 1977. – 162.
6. Суханов В.Г. Совершенствование крупнопанельных стен и перекрытий из керамзитобетона на карбонатном песке и особенности их расчета. Дис.... канд. техн. наук. – Одесса, - 1987. – 260 с.
7. Костюк А.И. Прочность и деформативность элементов из керамзитобетона на карбонатном песке при кратковременном и длительном нагружении. Дис.... канд. техн. наук. – Одесса, 1992. – 352 с.
8. Столевич И.А. Прочность, трещиностойкость, деформативность кералитобетона им конструкций на его основе. Дис.... канд. техн. наук. – Одесса, 2005. – 272 с.
9. Рекомендации по учёту потерь предварительного напряжения от усадки и ползучести керамзитобетона на карбонатном песке / НИЛЭП ОИСИ. – М.: Стройиздат, 1987. – 104 с.
10. Рекомендации по проектированию конструкций из керамзитобетона на карбонатном песке / НИЛЭП ОИСИ. – М.: Стройиздат, 1990. – 88 с.
11. Керамзитобетон на карбонатном песке в конструкциях жилых и общественных зданий. / обзорная информация. – М.: ВНИИТАГ Госкомархитектуры, 1990. – 57 с..