

УДК 624.044:624.041.6

ВЛИЯНИЕ ФАКТОРОВ СОСТАВА НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КЕРАЛИТОБЕТОНА

Дорофеев В.С., Столевич И.А., Столевич А.С. (Одесская государственная академия строительства и архитектуры)

Приведены физико-механические характеристики заводских проб пористого заполнителя – кералита. Получены удобные для практического использования зависимости основных свойств кералитобетона на карбонатном песке от факторов состава.

Легкие бетоны на пористых заполнителях представляет собой универсальный строительный материал, позволяющий при его рациональном использовании решать многие актуальные задачи современного строительства и одновременно решать экологические, ресурсосберегающие и экономические проблемы за счет технологических и техногенных отходов при применении и изготовлении местных пористых заполнителей.

Таблица 1

Физико-механические свойства заводских проб кералита

Наименование показателя	Фракция, мм		Значение по ГОСТ 9757 - 90
	5 - 10	10 - 20	
Насыпная плотность, кг/м ³	350 - 540	300 - 500	250 - 600
Содержание фракции, %	36,5	61,5	-
Прочность при сжатии (сдавливании в цилиндре), МПа	2,5 - 3,3	2,0 - 2,5	0,8 - 2,5 и более
Водопоглощение, %	7 - 9	9 - 11	Не более 30
Влажность, %	0,1 - 0,4	0,2 - 0,5	Не более 5,0
Коэффициент формы зерен	1,3 - 1,4	1,3 - 1,5	Не более 2,5
Коэффициент вспучивания	2,5 - 3,0	2,5 - 5,0	-
Содержание размолотых зерен, %	3	4	Не более 15
Морозостойкость (25 циклов), %	Нет потерь	Нет потерь	Не более 8
Потеря в массе при кипячении, %	3,2	3,2	Не более 5
Содержание водорастворимых сернистых и сернокислых соединений, %	0,02	0,02	Не более 1

В мировой практике нет опыта переработки и рационального использования в строительстве извлеченных при дноуглублении илистых грунтов. Разработанная и внедренная технология утилизации грунтов при дноуглублении на Черноморском и Азовском бассейнах решает актуальную задачу производства нового строительного материала - кералита. В портах Черноморского и Азовского бассейнов Украины объем дноуглубительных работ составляет более 10 млн. м³ в год.

В соответствии с СН 483-76 такой кералитовый гравий может быть рекомендован для получения конструкционных кералитобетонов прочностью 10...25 МПа и выше.

В качестве мелкого заполнителя применяли карбонатный песок Орловского местонахождения Одесской области, полученный путем дробления и отсева отходов камнепиления и кусков низкопрочного известняка – ракушечника. Применение такого песка в качестве мелкого заполнителя для различных бетонов, в том числе и для легкого бетона, регламентировано РСТ УССР 5014-82 и подтверждено многочисленными исследованиями.

Усредненные результаты испытаний партий карбонатного песка, приведенные в табл. 4, показали, что такой песок удовлетворяет требованиям ГОСТ 8736-85 и РСТ УССР 5014-82 и может быть использован для получения кералитобетонов прочностью до 30 МПа.

Подбор составов конструкционного кералитобетона производили расчетно-экспериментальным методом с обеспечением требований по прочности и удобоукладываемости смеси и заданной объемной массе бетона. При заданном расходе цемента Ц, кг/м³ – X₁ и воды, которые определяются соответственно требуемой прочности и удобоукладываемости бетонной смеси, предусматривают определенные показатели подвижности (ОК, см), либо показатели жесткости (Ж, сек) – X₃ (принят Ж=35сек. С интервалом варьирования ±31сек). Для получения заданной объемной массы бетона необходимо установить расход крупного (К) и мелкого (М) заполнителей, характеризуемый агрегатно-структурным фактором $g=M/(M+K)$ – X₂. Время перемешивания смеси кералитобетона X₄ принято t_н=5мин. Интервал варьирования ±3мин. Время виброуплотнения кералитобетонной смеси X₅ принято для смесей с ОК=4-6см t_в = 25 – 30с.

Обработка результатов эксперимента с целью выявления закономерностей влияния исследуемых факторов – расхода цемента (X₁), агрегатно-структурного фактора (X₂) и удобоукладываемости (X₃) на водопотребность кералитобетонных смесей позволили получить с 95% надежностью квадратичное уравнение регрессии, которая с учетом только значимых коэффициентов регрессии имеет вид:

$$B = 259 + 5X_1 + 14X_2 - 19X_3 + 14X_2^2 + 9X_1X_2 + 9X_2X_3. \quad (1)$$

Уравнение регрессии объема межзерновых пустот:

$$V_{п} = 1513 - 0,725X_1 - 1,114X_2 + 0,283X_3 - 0,257X_4 - 0,238X_5 + 0,432X_3^2 + 0,287X_1X_4 + 0,207X_1X_5 - 0,172X_2X_3. \quad (2)$$

Квадратичное уравнение плотности кералитобетонной смеси:

$$\rho_0 = 1815 + 56X_1 + 152X_2 + 12X_3 + 10X_4 - 26X_2^2 - 24X_1X_2 + 7X_4X_5 \quad (3)$$

и плотности кералитобетона в высушенном до постоянной массы состоянии:

$$\rho = 1740 + 57X_1 + 156X_2 + 11X_4 - 26X_2^2 - 23X_1X_2 + 8X_4X_5. \quad (4)$$

Кубиковую прочность:

$$R_{(28)} = 26,9 + 14,3X_1 - 7,2X_2 + 3,7X_3 - 2,2X_1^2 - 3,3X_3^2 - 1,3X_1X_2 + 1,7X_4X_5. \quad (5)$$

По результатам обработки экспериментальных исследований с 95% надежностью получены квадратичные уравнения S_R^2 и S_ρ^2 :

$$S_R^2 = 75 + 69X_1 - 42X_2 + 32X_3 + 30X_4 + 50X_2^2 - 18X_1X_2 + 23X_1X_3 + 32X_1X_4 - 21X_2X_3 + 23X_3X_4; \quad (6)$$

$$S_\rho^2 = 292 - 40X_1 + 39X_2 - 29X_5 - 38X_1X_3 + 68X_1X_4 + 54X_3X_5 - 33X_4X_5. \quad (7)$$

На основании полученных выше зависимостей и графиков, а также исходя из требований, предъявляемых к легким бетонам, производили назначение оптимальных составов кералитобетона на карбонатном песке.

Оптимальный состав конструкционного кералитобетона должен обеспечить заданную прочность, минимально возможную плотность и минимально возможную стоимость. Очевидно, что два последних требования одновременно не могут быть обеспечены, так как снижение плотности кералитобетона приводит к увеличению его стоимости и наоборот.

Для оптимизации кералитобетона с учетом экономического критерия на базе экспериментальных данных по фактическим составам были рассчитаны их стоимости, обработка результатов этих расчетов позво-

лила получить с 95% надежностью, квадратичное уравнение регрессии, связывающее стоимость 1 м^3 кералитобетона с расходами его компонентов.

Полученное уравнение с учетом только статистически значимых коэффициентов имеет вид

$$C = 128,6 + 13,2X_1 - 37,6X_2 + 5,2X_1X_2 - 3,1X_2^2 \quad (8)$$

Уравнение по F – Фишера адекватно ($F_{ад.} < F_{табл.}$) и имеет информационную ценность ($F_{инф.} > F_{табл.}$).

Методика подбора оптимальных составов включает следующие этапы:

1. Вычисление значений прочности кералитобетона $R_{(28)}$, соответствующих заданному классу бетона по прочности на сжатие с учетом конкретных условий производства (C_{VR}), по формуле

$$R_{(28)} = B / (1 - 1,64C_{VR}). \quad (9)$$

2. По комплексной номограмме устанавливается группа составов (расходы цемента Ц и значения r), удовлетворяющих прочности $R_{(28)}$.

3. По комплексной номограмме для каждого из составов удовлетворяющих прочности $R_{(28)}$, определяется плотность кералитобетона ρ .

4. По уравнению (3.1) для каждого из составов по полученным расходам цемента Ц и значениям r вычисляется предварительный расход воды.

5. Для каждого состава по принятому расходу цемента Ц и значению g определяется стоимость кералитобетона С.

6. Если плотность кералитобетона не задана, то назначение оптимального состава производится выбором из установленной группы того состава, который обеспечивает минимальную стоимость бетона. В противном случае из установленной группы составов выбирается состав, удовлетворяющий заданным прочности и плотности. Назначенный состав принимается в качестве исходного оптимального состава.

В (табл. 3) приведены оптимальные составы кералитобетона на карбонатном песке прочностью 10 ... 30 МПа.

Для решения поставленных задач, а также с учетом результатов проведенных ранее исследований были выбраны следующие факторы и назначены уровни их варьирования:

1. Расход цемента Ц, кг/м^3 – X_1 . ($C = 400 \pm 150 \text{ кг/м}^3$);
2. Агрегатно-структурный фактор r – X_2 . ($r = 0,625 \pm 0,375$);
3. Возраст бетона к моменту испытаний t , сут. – X_3 .

Таблица 3

Оптимальные составы кералитобетона на карбонатном песке

Проектная прочность, МПа	Расход материалов на 1м ³ бетона					Плотность бетона ρ, кг/м ³
	г	Цемент Ц, кг/л	Песок М, кг/л	Кералит К, кг/л	Вода В, л	
10	1,85	$\frac{250}{80,6}$	$\frac{1194}{506}$	$\frac{211}{468}$	202	1685
15	0,75	$\frac{280}{90,3}$	$\frac{1025}{434}$	$\frac{342}{760}$	178	1675
20	0,75	$\frac{360}{116,1}$	$\frac{975}{413}$	$\frac{325}{722}$	192	1690
25	0,75	$\frac{455}{146,7}$	$\frac{919}{389}$	$\frac{306}{680}$	203	1710
30	0,75	$\frac{540}{174,2}$	$\frac{870}{368}$	$\frac{290}{644}$	210	1730

По результатам экспериментальных исследований прочностных свойств кералитобетона с 95% надежностью получены квадратичные уравнения регрессии призмной прочности в возрасте $t = 7, 28, 115, 300, 500$ сут. Уравнения по F – критерию Фишера адекватны ($F_{ад} < F_{табл.}$), имеют информационную ценность ($F_{инф.} > F_{табл.}$). Незначимые коэффициенты (подчеркнутые) приведены из соображений единообразия уравнений.

$$R_b(7) = 12,7 + 5,5X_1 - 5,2X_2 + \underline{0,3}X_1X_2 - 1,3X_1^2 + 2,8X_2^2; \quad (10)$$

$$R_b(28) = 20,6 + 6,2X_1 - 5,1X_2 + \underline{1,7}X_1X_2 - 3,1X_1^2 + 1,2X_2^2; \quad (11)$$

$$R_b(115) = 24,6 + 5,8X_1 - 5,6X_2 + 4,3X_1X_2 - 3,9X_1^2 + \underline{2,4}X_2^2; \quad (12)$$

$$R_b(300) = 25,2 + 6,2X_1 - 5,9X_2 + 4,5X_1X_2 - 2,2X_1^2 + 2,9X_2^2; \quad (13)$$

$$R_b(500) = 26,2 + 8,3X_1 - 4,7X_2 + 5,8X_1X_2 - \underline{1,4}X_1^2 + \underline{1,4}X_2^2. \quad (14)$$

Из уравнений регрессий кубиковой (5) и призмной (11) прочностей видно, что влияние расхода цемента (X_1) и агрегатно-структурного фактора γ (X_2) в возрасте $t = 28$ сут. на призмную прочность кералитобетона качественно не отличается от их влияния на призмную прочность.

Для упрощения квадратичных уравнений регрессии (1 - 5) при значении аргумента X исходим из необходимости учета существенно влияющего на прочность, но не включенного в качестве фактора расхода воды. Это позволило, используя методику регрессивного анализа, для каждого из принятых возрастов кералитобетона получить линейные уравнения регрессии вида:

$$R_b(7) = 33,6 - 14,3[(B/C) + \gamma]; \quad (15)$$

$$R_b(28) = 41,3 - 14,7[(B/C) + \gamma]; \quad (16)$$

$$R_b(115) = 45,9 - 15,3[(B/C) + \gamma]; \quad (17)$$

$$R_b(300) = 49,7 - 17,4[(B/C) + \gamma]; \quad (18)$$

$$R_b(500) = 50,4 - 17,6[(B/C) + \gamma]. \quad (19)$$

В общем виде зависимость $R_b(t, B/C, \gamma)$ имеет структуру линейного уравнения:

$$R_b(t, B/C, \gamma) = K(t) - A [(B/C) + \gamma]. \quad (20)$$

Значение коэффициента A равно усредненному по всем возрастам значению коэффициента регрессии при обобщенном факторе состава $(B/C) + \gamma$ в линейных уравнениях регрессии.

С учетом полученных коэффициентов временная зависимость прочности имеет вид:

$$R_b(t, B/C, \gamma) = (50,4 - 16,8e^{-0,0133t}) - 15,8[(B/C) + \gamma]. \quad (21)$$

Для перехода от кубиковой прочности R к призмной R_b , используют коэффициент призмной прочности $\varphi_b = R_b/R$.

Для оценки влияния изменения прочности кералитобетона на величину φ_b методом наименьших квадратов получено уравнение регрессии

$$\varphi_b = 0,933 + 0,0032R - 0,000149R^2. \quad (22)$$

По результатам экспериментальных исследований с 95% надежностью получены квадратичные уравнения регрессии модуля упругости кералитобетона на карбонатном песке в возрасте $t = 7, 28, 115, 300, 500$ сут. Уравнения по F критерию Фишера адекватны ($F_{ад} < F_{табл.}$), имеют информационную ценность ($F_{инф.} > F_{табл.}$) и с учетом статистически незначимых коэффициентов приведены ниже (статистически незначимые коэффициенты подчеркнуты).

$$E_b(7) = 11337 + 2484X_1 - 2272X_2 + 698X_1X_2 - 1717X_1^2 + 653X_2^2; \quad (23)$$

$$E_b(28) = 12392 + 2178X_1 - 1760X_2 + 1697X_1X_2 - 1896X_1^2 + 1127X_2^2; \quad (24)$$

$$E_b(115) = 13416 + 2792X_1 - \underline{735}X_2 + 1734X_1X_2 - 1711X_1^2 + 182X_2^2; \quad (25)$$

$$E_b(300) = 11412 + 2104X_1 - \underline{202}X_2 + 1994X_1X_2 - 722X_1^2 + 1185X_2^2; \quad (26)$$

$$E_b(500) = 11280 + 2760X_1 - \underline{114}X_2 + 1710X_1X_2 - 838X_1^2 + 1142X_2^2. \quad (27)$$

Анализ влияния исследуемых факторов состава проводили по уравнению (24). В принятом уравнении все коэффициенты при членах регрессии статистически значимы.

Из этого уравнения видно, что «мощность» влияния расхода цемента (X_1) на модуль упругости несколько больше фактора r (X_2), хотя оба они в значительной степени влияют на указанную величину.

В результате применения регрессионного анализа для каждого из принятых возрастов кералитобетона получены линейные уравнения регрессии вида:

$$E_b(7) \cdot 10^{-3} = 19,27 - 5,87 [(B/C) + r]; \quad (28)$$

$$E_b(28) \cdot 10^{-3} = 19,14 - 4,71 [(B/C) + r]; \quad (29)$$

$$E_b(115) \cdot 10^{-3} = 18,79 - 3,78 [(B/C) + r]; \quad (30)$$

$$E_b(300) \cdot 10^{-3} = 18,69 - 3,33 [(B/C) + r]; \quad (31)$$

$$E_b(500) \cdot 10^{-3} = 18,61 - 3,21 [(B/C) + r]. \quad (32)$$

Расчетные значения модуля упругости для каждого заданного состава, приняты в качестве исходных для последующих расчетов.

Основываясь на имеющихся рекомендациях, изменение модуля упругости во времени в наших исследованиях предложено описывать зависимостью вида

$$E_b(t) = E_b(\infty)[1 - e^{-\alpha t}]. \quad (33)$$

Для каждого состава кералитобетона, обусловленного уровнями варьирования факторов X_1 и X_2 , по опытным значениям $E_b(t)$ были получены предельные значения $E_b(\infty)$ и коэффициента α .

$$E_b(\infty) = 11956 + 2787X_1 - 449X_2 + 1793X_1X_2 - 1190X_1^2 + 941X_1^2; \quad (34)$$

$$\alpha = 0,391 + 0,023X_1 - 0,197X_2 - 0,082X_1X_2 - 0,016X_1^2 + 0,005X_2^2. \quad (35)$$

В случае, если влиянием воды на изменение во времени характера модуля упругости не пренебрегать, то для определения значений параметров $E_b(\infty)$ и α можно использовать упрощенные выражения, имеющие вид:

$$E_b(\infty) = 18380 - 3972 [(B/C) + r]; \quad (36)$$

$$\alpha = 0,87 - 0,34 [(B/C) + r]. \quad (37)$$

Эти выражения с несколько меньшей точностью по сравнению с (33) и (34) описывают параметры $E_b(\infty)$ и α , но удобны для практиче-

ских расчетов.

Для выявления формы наиболее тесной связи между модулями упругости E_b , прочностью R_b и плотностью ρ кералитобетона на карбонатном песке по результатам исследований был проведен корреляционный анализ между функцией Y – расчетными удельными значениями модуля упругости $E_b(\infty)$ и набором аргументов $X - \rho^n R_b^m$. Установлено, что требованию наиболее тесной линейной связи соответствует выражение вида:

$$E_b(\infty) = A \sqrt[3]{\rho R_b(28)}, \quad (38)$$

где A – коэффициент, определяемый методом наименьших квадратов.

Выводы:

1. Рецептурно-технологические факторы оказывают существенное влияние на формирование основных свойств кералитобетонных смесей и бетона на карбонатном песке. Учет влияния этих факторов с достаточной для практики точностью рекомендуется осуществлять используя уравнения регрессии.
2. Для оптимизации составов кералитобетона на карбонатном песке рекомендуется использовать методику комплексного подхода, учитывающую технологические и эксплуатационные требования к бетону. Использование рекомендованной методики позволяет получить рациональные составы, удовлетворяющие требованию минимальной стоимости бетона с учетом его назначения.
3. Значения коэффициента призмной прочности ϕ_b и модуля упругости E_b исследуемого бетона отличаются от рекомендованных СНиП 22.03.01-84*. Поэтому величины ϕ_b и E_b рекомендуется определять по выражениям (22) и (33) с учетом (35), (37).
4. Для прогнозирования изменяющихся во времени значений прочности $R_b(t)$ и $E_b(t)$ рекомендуется использовать выражение (21) и (33) с учетом (36), (37).

1. Чуприн В.Н. и др. Сырьевая смесь для изготовления кералита.// А.С.1698212.БИ№46 – М., 1991. 2. Чуприн В.Н. и др. Технология кералита. Одесса, «УкрЦНТИ», 1991. (ЧМНИИП, НТД №199 – 91). 3. РСТ УССР 5014-82. Песок карбонатный из известняков – ракушечников. – Киев, 1982. – 16 с. 4. Рекомендации по учету комплекса технологических и эксплуатационных параметров, оптимизирующих свойства конструкционного керамзитобетона на карбонатном песке: НИЛЭП ОИСИ. - М.: Стройиздат, 1989. – 67 с. 5. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний / Справочник. – М.: «Машиностроение», 1985. – 231 с. 6. Ваганов А.И. Исследование свойств керамзитобетона. – Л. – М., 1960. – 57 с.