

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ КЕРАМЗИТОБЕТОННЫХ НА КАРБОНАТНОМ ПЕСКЕ СМЕСЕЙ И БЕТОНОВ

**Столевич А.С., к.т.н., проф., Костюк А.И., к.т.н., доц.,
Столевич И.А., к.т.н., доц.**

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

Керамзитобетон является основным видом лёгких бетонов, применяемых в настоящее время в строительстве, и составляет более 70% общего объёма их производства.

Керамзитобетон на карбонатном песке - одна из разновидностей легких бетонов, является местным строительным материалом, использование которого определяется прежде всего наличием сырьевой базы для изготовления керамзита и получения карбонатного песка.

Дефицит качественных мелких заполнителей для бетонов на пористых заполнителях во многих регионах может быть восполнен широким применением для их производства отходов камнепиления карбонатных пород (пористых известняков, известняков ракушечников).

На базе месторождения карбонатных пород в карьерах ведётся добыча пильного стенового камня, при получении которого отходы составляют 25...70%. Народнохозяйственное значение утилизации этих отходов диктуется не только соображениями получения самых дешёвых пористых заполнителей, но и целесообразностью освобождения от отходов значительных территорий в целях их рекультивации и использовании в сельском хозяйстве. Отходы камнепиления в большинстве случаев представляет собой смесь дисперсных, песчаных и мелких щебёночных фракций с преобладанием песчаных, которые могут быть выделены из смеси дроблением с последующим рассевом или только рассевом. Полученные таким образом карбонатные пески используются в качестве мелкого заполнителя для различных бетонов: тяжёлых, облегчённых, лёгких на природных крупных заполнителях. Комплексное исследование и практика применения таких бетонов показали их конкурентную способность с аналогичными бетонами на кварцевом песке.

Следствием положительного опыта использования карбонатных песков в бетонах на плотных и пористых природных заполнителях явилось изучение возможности применения их в бетонах на искусственных пористых заполнителях и, в первую очередь, в керамзитобе-

тоне.

Экспериментальные исследования основных свойств керамзитобетона на карбонатном песке, смесей и бетона проводили по методике планированного эксперимента. Схема проведения экспериментальных исследований приведена ниже.

СХЕМА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ



Экспериментальные исследования состояли из двух этапов:

На первом этапе исследовали влияние рецептурных (расхода цемента и агрегатно-структурного фактора) и технологических (удобоукладываемость, время перемешивания смеси в смесителе и время ее виброуплотнения) факторов на основные физико-механические свойства керамзитобетонной смеси (пористость, расслаиваемость, плотность) и бетона (прочность, плотность, прочностную однородность и однородность по плотности).

В качестве контролируемых параметров были выбраны:

1. Объем межзерновых пустот $V_{п}$, показатель расслаиваемости Π_p и плотность керамзитобетонной смеси ρ_0 .

2. Расход воды для достижения заданной удобоукладываемости смеси.

3. Кубиковая прочность $R(28)$ и плотность керамзитобетона в высушенном до постоянной массы состоянии ρ .

4. Дисперсия прочности S^2_R и плотности S^2_ρ керамзитобетона.

Помимо этого на первом этапе проводили исследования влияния рецептурных факторов (расхода цемента и агрегатно-структурного фактора) на изменение подвижности смеси во времени. В качестве контролируемого параметра принята подвижность смеси через заданные промежутки времени после ее изготовления ОКт.

Подбор состава конструкционных легких бетонов, как и других видов бетонов, производится расчетно-экспериментальным методом. В отличие от обычного бетона, кроме требований по прочности бетона и удобоукладываемости смеси, необходимо обеспечить требование по заданной объемной массе бетона [1].

В результате реализации первого этапа экспериментальных исследований (испытание и анализ результатов испытаний) по разработанной методике получены оптимальные по заданным критериям технологические параметры для каждого исследуемого состава керамзитобетона на карбонатном песке, обусловленного рецептурными факторами и уровнем их варьирования.

На втором этапе исследовали прочностные и деформативные характеристики керамзитобетона на карбонатном песке при нагрузках различной длительности и интенсивности, сцепление арматуры с бетоном, а также работу сжатых бетонных и изгибаемых железобетонных конструкций, в том числе и предварительно напряженных.

В экспериментальных исследованиях, проводимых по методике планированного эксперимента, в качестве основных контролируемых параметров были выбраны:

1. Кубиковая прочность $R(28)$ и призменная R_{bt} в возрасте 7, 28,

115, 300, 500 суток.

2. Модуль упругости $E_b(t)$ в тех же возрастах.

3. Предельные деформации сжатия $\epsilon_{бу}$ керамзитобетона при загрузке кратковременной нагрузкой.

4. Параметрические уровни микротрещинообразования $R_{сж}^o$ и $R_{сж}^v$ при загрузке кратковременной нагрузкой.

5. Относительные деформации усадки $\epsilon_{сд}(t, tw)$, начальный отсчет времени tw соответствовал окончанию времени схватывания бетона.

6. Относительные деформации ползучести $\epsilon_{сч}(\sigma, t, t_0)$ керамзитобетона, загруженного в возрастах $t_0 = 7, 28, 115$ сут. нагрузкой, равной $0,2 R_b S$; $0,6 R_b S$; $0,8 R_b S$.

Эффективность решения поставленных задач исследования в значительной мере зависит от применяемых методов планирования и обработки результатов эксперимента. В настоящее время наиболее перспективным направлением в области методологии экспериментальных исследований являются математико-статистические методы, использование которых уже имеет свои традиции и опыт, что и было принято нами за основу.

В основе примененных в работе математико-статистических методов лежит методика планирования эксперимента, использованная при исследовании:

- 1) свойств керамзитобетонной смеси и бетона;
- 2) оптимизация технологических параметров приготовления и уплотнения керамзитобетонной смеси;
- 3) оптимизация составов керамзитобетона.

Преимущества экспериментальных исследований с использованием математических методов их планирования сформулированы в работах В.В.Налимова. Вместе с тем планирование имеет недостатки субъективного характера, связанные в основном с отсутствием четких рекомендаций по выбору плана, в наибольшей степени удовлетворяющего всем условиям конкретного эксперимента.

Промежуточным результатом проведения планированного эксперимента является математическая модель, которую удобно представить в виде полинома n -ой степени. Для решения практических задач исследования технологических процессов производства строительных материалов и их свойств рекомендуется полином 2-ой степени и используемые для их получения планы 2-го порядка [2, 3, 4, 5]

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i \neq j} b_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

Для изучения основных свойств керамзитобетонной смеси и бетона и последующей оптимизации технологических параметров ее приго-

товления нами был выбран близкий к D – оптимальному плану второго порядка типа Na_5 на гиперкубе (т.е. с расположением факторов на трех уровнях: $-1, 0, +1$).

Этот тип плана приближен к D – оптимальному непрерывному плану, при котором объем эллипсоида рассеяния минимален. Он обладает симметричным расположением точек в факторном пространстве, дает независимые оценки для всех коэффициентов модели и позволяет значительно сократить число опытов. Эффективность их использования при исследовании свойств смесей и бетонов показана в работах В.А.Вознесенского и многих других авторов. Используемая в наших исследованиях методика получения и статистического анализа уравнений регрессии вида (1) по близким к D –оптимальным планам, включающая расчет коэффициентов уравнений регрессии, их статистический анализ, оценку адекватности и информационной способности уравнений регрессии, приведена в [6].

Для исследования прочностных и деформативных свойств керамзитобетона при кратковременном и длительном действии нагрузки был выбран почти рототабельный трехуровневый план Бокса-Бенкена размерности $K=3$. Особенностью этого плана является возможность стабилизации значений ряда факторов в многофакторной ситуации в определенной группе опытов, а также, что он строится на гиперкубе [7].

Использованная в наших исследованиях методика расчета оценок коэффициентов регрессии и их ошибок, построения и статистического анализа регрессионных моделей вида (1) по почти рототабельным планам Бокса - Бенкена приведена в [7].

Для некоторого улучшения статистических характеристик стандартных, близких к D – оптимальным планов, а также для более точной оценки ошибки опыта к имеющимся нулевым точкам применяемых планов добавили еще несколько точек.

Для упрощения полученных на II этапе экспериментальных исследований зависимостей вида (1) проводили математико-статистический анализ новой зависимости вида:

$$Y = b_0 + b_1 \cdot x \quad (2)$$

Учитывая, что Y и X случайные величины, мы провели:

- 1) проверку нормальности распределения экспериментальных значений Y и X [5];
- 2) установление тесноты линейной связи между величинами Y и X [8];
- 3) получение линейного уравнения регрессии вида (2) с графической проверкой линейности и вычислением меры индивидуального рас-

сеяния вокруг линии регрессии [8];

4) проверку (при необходимости) значимости уравнения регрессии по коэффициенту b_1 - дополнительно к корреляционному анализу (дисперсионный анализ) [5, 8];

5) построение доверительных интервалов при заданной доверительной вероятности [8];

6) проверку гипотезы об однородности дисперсий величин Y и X [8].

Задачи оптимизации приготовления и уплотнения керамзитобетонной смеси, оптимизации составов керамзитобетона решали, используя диссоциативно-шаговый метод поиска оптимума [9], позволяющий находить оптимальные в зоне эксперимента значения одновременно для всех рассматриваемых факторов.

При исследовании изменения прочностных и деформативных характеристик керамзитобетона при кратковременном (“временные” зависимости) и длительном действии нагрузки математико-статистические методы использовали для:

1) оценки существенности влияния возраста керамзитобетона на изменение указанных характеристик от воздействия рецептурных факторов;

2) получения и анализа зависимостей, описывающих изменение указанных характеристик керамзитобетона во времени.

Оценку влияния возраста керамзитобетона на характер изменения его прочностных и деформативных характеристик при кратковременном и длительном действии нагрузки от воздействия рецептурных факторов осуществляли путем проверки нулевой гипотезы H_0 об однородности дисперсий S^2 указанных величин, рассчитанных по уравнениям регрессии вида (1).

Уравнения регрессии, учитывающие изменения прочностных и деформативных характеристик во времени, получали методом наименьших квадратов, представляя уравнение кривой регрессии как линейное соотношение между преобразованными величинами, к которым применим аппарат регрессионного анализа.

Разброс опытных значений прочностных и деформативных характеристик керамзитобетона относительно линии регрессии оценивали по величине дисперсий S^2 , коэффициентов вариации C_v и мер индивидуального рассеяния, δ_y .

Оценку точности и надежности результатов испытаний опытных конструктивных элементов проводили по методикам статистического анализа, приведенных в работе [10].

Анализ литературных источников в подобного рода исследованиях,

а также результаты проведенных нами предварительных опытов позволили выбрать следующие факторы и назначить уровни их варьирования:

1. Расход цемента C , $\text{кг/м}^3 - X_1$.

Пределы варьирования расхода цемента назначали с учетом обеспечения необходимой прочности, плотности и заданной макроструктуры керамзитобетона. Расход цемента на основном (О) уровне принят $C = 375 \text{ кг/м}^3$. Интервал варьирования $\pm 175 \text{ кг/м}^3$.

2. Агрегатно-структурный фактор $r - X_2$.

Агрегатно-структурный фактор характеризует степень насыщения бетонной смеси крупным (К) и мелким (М) заполнителями и определяется отношением $r = M/(M+K)$. В наших исследованиях агрегатно-структурный фактор r представляет собой отношение насыпного объема карбонатного песка (М) к сумме пофракционных объемов карбонатного песка и керамзитового гравия (М+К). В технологии легкого бетона при использовании низкопрочных пористых заполнителей влияние этой характеристики на свойства смеси бетона представляет более существенный интерес, чем в технологии тяжелого бетона. Агрегатно-структурный фактор используется как характеристика для оптимизации структуры (составов) легкого бетона в зависимости от комплекса требуемых свойств легкобетонных смесей и эксплуатационных свойств бетона в конструкциях.

Для обеспечения решения задач исследования значение агрегатно-структурного фактора r на основном (О) уровне было выбрано равным 0,65. Интервал варьирования $\pm 0,35$.

Принятое на верхнем уровне варьирования (+1) значение $r = 1$ обеспечивает получение мелкозернистого бетона слитной структуры (фракция 0 – 1,25 мм мелкого заполнителя не исключалась).

3. Удобоукладываемость смеси – X_3 .

Принятые в Украине методы испытания по определению удобоукладываемости бетонной смеси предусматривают определение показателя подвижности (ОК, см), либо показателя жесткости (Ж, с).

Значение показателя удобоукладываемости смеси на основном (О) уровне было выбрано равным $Ж = 35 \text{ с}$. Интервал варьирования $\pm 31 \text{ с}$. Для обеспечения получения заданного значения показателя жесткости смеси, соответствующего нижнему уровню фактора, были использованы результаты исследований В. И. Шеина. Им проведена экспериментальная и теоретическая оценка показателей подвижности и жесткости в “переходном” интервале этих характеристик и установлена сопоставительная связь между ними. Так, при размерах крупного заполнителя до 20 мм показателю жесткости смеси $Ж = 4 \text{ с}$ (нижний интервал фак-

тора) соответствует показатель подвижности ОК = 6 см. Такое соответствие между показателем подвижности и жесткости позволило получить смеси с заданным показателем удобоукладываемости и обеспечить выполнение условий проведения планированного эксперимента.

4. Время перемешивания керамзитобетонной смеси t_n , мин. – X₄.

Важным вопросом при приготовлении легкобетонных смесей является установление рациональной длительности их перемешивания.

Рекомендуемые рядом авторов и нормативными документами время перемешивания бетонной смеси зависит от показателей удобоукладываемости, наибольшего размера зерен заполнителя, типа смесителей, объема приготовляемой смеси, проектной прочности бетона и для смесей с показателем подвижности ОК ≤ 6 см колеблется в пределах 100-300 с.

Пористые заполнители по сравнению с плотными имеют меньшую насыпную плотность, поэтому легкобетонные смеси необходимо перемешивать дольше. Учитывая это и приведенные выше рекомендации, время перемешивания на основном (О) уровне принято равным $t_n = 5$ мин. Интервал варьирования ± 3 мин.

5. Время виброуплотнения керамзитобетонной смеси t_v , с – X₅.

Легкобетонные смеси на пористых заполнителях по сравнению со смесями на плотных материалах обладают повышенным внутренним трением, меньшей средней плотностью, большим сопротивлением к сдвигу и большей склонностью к расслоению, особенно под воздействием вибрации. Это обуславливает особенности технологии виброуплотнения легкобетонных смесей и, в частности, назначение времени их виброуплотнения.

Учитывая условия проведения эксперимента и рекомендации, время вибрирования на основном (О) уровне принято равным $t_v = 105$ с. Интервал варьирования ± 75 с.

6. Последовательность загрузки компонентов и режим приготовления керамзитобетонной смеси (ПЗ).

Для реализации эксперимента по принятому плану с учетом приведенных выше рекомендаций выбрали наиболее эффективную по прочности и плотности последовательность загрузки и режима приготовления керамзитобетонной смеси: приготовление растворной составляющей в течение 2 – 3 минут с последующим загрузением керамзита и перемешиванием в течение заданной продолжительности времени.

Для изучения свойств керамзитобетона на карбонатном песке при кратковременном действии нагрузки с учетом результатов проведенных ранее исследований были выбраны следующие факторы и назначены уровни их варьирования:

1. Расход цемента ρ , кг/м³ – X_1 .

В качестве основного (0) уровня был выбран расход цемента $\rho = 400 \text{ кг/м}^3$.

Интервал варьирования $\pm 150 \text{ кг/м}^3$.

2. Агрегатно-структурный фактор r – X_2 .

Значение агрегатно-структурного фактора на основном (0) уровне было выбрано $r = 0,625$. Интервал варьирования $\pm 0,375$.

3. Возраст бетона к моменту испытаний t , сут. – X_3 .

Возраст бетона t к моменту испытаний оказывает влияние на его прочностные и деформативные характеристики. Различают три зоны по степени вызревания бетона: интенсивно стареющий, стареющий и старый бетон. Поэтому возраст керамзитобетона к моменту испытаний был выбран на основном (0) уровне $t = 28$ сут., на нижнем (-1) $t = 7$ сут. и на верхнем (+1) $t = 115$ сут.

Для обеспечения адекватного описания исследуемых свойств применяли прием преобразования независимой переменной t .

Помимо основных контролируемых параметров, в качестве дополнительного назначали коэффициент призмочной прочности ϕ_v .

Опыты проводили по близкому к D – оптимальному плану размерности $K = 2$, все строчки которого органически входят в состав плана Бокса-Бенкена размерности $K = 3$.

Выводы

1. Наибольшее влияние на водопотребность керамзитобетонной смеси удобоукладываемостью ОК=6см – Ж=35с оказывает агрегатно-структурный фактор. Влияние этого фактора неоднозначно и зависит от расхода цемента и удобоукладываемости смеси. Для заданного расхода цемента и заданной удобоукладываемости смеси существует оптимальное значение агрегатно-структурного фактора, при котором достигается минимально возможная водопотребность смеси.

2. Наибольшее влияние на объем межзерновых пустот оказывает агрегатно-структурный фактор. Увеличение его значений от 0,3 до 1 приводит к уменьшению V_n в среднем в 2 раза.

3. Расслаиваемость керамзитобетонных смесей при их виброуплотнении избежать практически нельзя. В наибольшей степени расслаиваемость смеси зависит от агрегатно-структурного фактора и длительности виброуплотнения, и в значительно меньшей – от расхода цемента. При самых неблагоприятных сочетаниях указанных факторов расслаиваемость смеси не превышает 7,5%, что можно считать допустимым при проектировании составов керамзитобетона.

4. Экспериментально установлено, что правило постоянства водопотребности действует независимо от времени выдержки керамзитобетонной смеси до ее укладки в конструкции. Определяющее влияние на характер и величину изменения подвижности керамзитобетонной смеси во времени оказывает концентрация керамзитового гравия. Подвижность смесей при значениях τ , равных 0,25; 0,625; 1 уменьшается за 1 час соответственно на 8,3 см; 5,5 см; 4,3 см.

5. Наибольшее влияние на плотность керамзитобетонной смеси и бетона оказывает агрегатно-структурный фактор. Влияние расхода цемента и технологических факторов сказывается в значительно меньшей степени.

6. Для оптимизации составов керамзитобетона на карбонатном песке рекомендуется использовать разработанную методику комплексного подхода, которая позволяет получить экономические по стоимости составы.

Summary

Methodology over of experimental researches of basic properties of keramzitconcrete is brought on carbonate sand, mixtures and concrete. The choice of the controlled parameters is reasonable.

1. Довжик В.Г., Дорф В.А., Петров В.П. Технология высокопрочных керамзитобетонов. – М.: Стройиздат, 1976. – 136 с.
2. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
3. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Исследование зависимостей / Справочное издание. – М.: Финансы и статистика, 1985. – 488 с.
4. Баженов Ю.М., Вознесенский В.А. Перспективы применения математических методов в технологии сборного железобетона. – М.: Стройиздат, 1974. – 191 с.
5. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. – М.: Высшая школа, 1982. – 224 с.
6. Рекомендации по применению методов математического планирования эксперимента в технологии бетона: НИИЖБ. - М., 1982. – 44 с.
7. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 264 с.
8. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний / Справочник. – М.: «Машиностроение», 1985. – 231 с.
9. Вознесенский В.А., Ковальчук А.Ф. Принятие решений по статистическим моделям. – М.: Статистика, 1978. – 192 с.
10. Вилков К.И. Конструкционный керамзитобетон при обычных и сложных деформациях. – М.: Стройиздат, 1984. – 240 с.