

УДК [691.32:623 073]+[691.217:620.3]

РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОНОВ С НАНОДОБАВКАМИ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ

Прудков Е.Н., Гордеева А.Н.

Тульский государственный университет, Тула

В работе предложены принципы и методы оптимизации составов многокомпонентного мелкозернистого бетона с учетом использования нанодобавок. В качестве нанодобавок использовались золи аморфного нанокремнезема, белая сажа, микрокремнезем. Произведена оценка эффективности влияния нанодобавок на свойства мелкозернистого бетона.

В последние годы активно внедряются в строительство многокомпонентные мелкозернистые бетоны. Новые технико-технологические возможности, особенно переход от обычных бетонов к многокомпонентным составам с широким использованием суперпластификаторов, тонкодисперсных наполнителей, добавок-модификаторов, в том числе нанодобавок, позволяет свести к минимуму недостатки обычных мелкозернистых бетонов (повышенное содержание цемента и воды, как следствие повышенная пористость, водонепроницаемость, снижение прочности, морозостойкости).

Основная задача наномодифицирования – это управление формированием структуры бетона от наноуровня к макроструктуре и кинетикой химического взаимодействия компонентов, сопровождающей процесс твердения бетона. Для получения высокопрочных и высококачественных мелкозернистых бетонов необходимо применять качественные материалы и добавки-модификаторы, при этом наиболее целесообразно использовать тройные системы «суперпластификатор – тонкодисперсный наполнитель – нанодобавки».

Известно, что для исследования многокомпонентных смесей наиболее широкие возможности и преимущества имеет математический метод планирования эксперимента, используемый при установлении оптимальных составов бетонов для прогнозирования заданных свойств [1].

В работе ставилась задача подобрать оптимальный состав наномодифицированного мелкозернистого бетона, твердеющего как в условиях тепловлажностной обработки, так и в условиях естественного нормального твердения с высоким показателем прочности на сжатие и изгиб, с пониженным водопоглощением и пористостью при введении в составы модифицирующих нанодобавок.

Проектируемый состав включал: портландцемент, песок, суперпластификатор «Реламикс», воду и в качестве наномодифицирующих добавок: золь нанокремнезема, белую сажу и микрокремнезем.

Исходными материалами для мелкозернистого бетона служили портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н по ГОСТ 31108-2003.

В качестве мелкозернистого заполнителя применяли речной песок по ГОСТ 8736-93.

Добавка «Реламикс» относится к классу суперпластификаторов по ТУ 5870-002-14153664-04 представляет собой смесь неорганических (роданидов и тиосульфатов) и органических (полиметиленафталинсульфонатов) солей натрия. Добавка «Реламикс» применяется для гомогенного распределения частиц SiO_2 в бетонной смеси. Введение суперпластификатора «Реламикс» также позволяет увеличить подвижность бетонной смеси, снизить водоцементное отношение.

Нанодобавку - золь нанокремнезема получают в виде стабильных концентрированных водных зольей из гидротермальных растворов с помощью ультрафильтрационных мембран [3]. Содержание аморфного кремнезема SiO_2 – 225 г/дм³. Плотность раствора золя - 1143 г/дм³. Минимальный размер зольей составляет 45 нм и средний размер 60 нм. На частицы с диаметром 45-100 нм приходится 65 % всей массы нанокремнезема.

Белая сажа марки БС-50 по ГОСТ 18307-78 с массовой долей оксида кремния SiO_2 не менее 76 %. Белая сажа состоит в основном из кремнезема в некристаллической форме. Материал обладает чрезвычайно высокой площадью поверхности, что является основой его высокой пуццолановой активности. Частицы белой сажи в большинстве являются сферическими, диаметром в среднем 100 нм. Площадь поверхности частиц белой сажи составляет 20-23 м²/г.

Микрокремнезем (МК) – аморфный кремнезем – образуется как побочный продукт при производстве ферросилиция и осаждается в электрофильтрах. Большую часть образуют частички аморфного оксида кремния круглой формы средним размером 0,1 мкм и удельной поверхностью 16-22 м²/г.

Планирование эксперимента и выбор состава мелкозернистого бетона с применением математико-статистических методов заключается в установлении математической зависимости между заданным свойством бетона и расходом и свойствами составляющих компонентов. Получаемая математическая зависимость используется для назначения и поиска оптимальных составов.

Поскольку ставилась задача определения прочностных характеристик в сравнительно узком диапазоне изменения переменных, принимали для реализации линейный план для $k = 3$.

В качестве переменных выбирали следующие компоненты, % от массы цемента: X_1 – расход золя нанокремнезема, X_2 – расход микрокремнезема, X_3 – расход белой сажи.

Значения интервалов варьирования факторов (переменных) приведены в табл. 1.

Таблица 1 - Значения интервалов варьирования факторов

Код	Значение кода	Значение факторов		
		X_1	X_2	X_3
Основной уровень	0	0,155	3	0,3
Интервал варьирования	ΔX_i	0,145	2	0,2
Верхний уровень	+	0,3	5	0,5
Нижний уровень	-	0,01	1	0,1

Постоянные параметры: расход портландцемента, песка, воды, суперпластификатора «Реламикс».

Расчет основного состава мелкозернистого бетона (расход цемента, песка, добавок и т.д.) производили в соответствии с рекомендациями руководства [2].

Исходя из условий, что количество переменных факторов равно 3 и варьирование их происходит на двух уровнях был реализован линейный план первого порядка.

Твердения образцов приняты в соответствии с поставленной задачей в условиях тепловлажностной обработки (ТВО) и в условиях естественного твердения (28 суток твердения в нормальных условиях).

Результаты опытов обрабатывались с использованием методов математической статистики, получая при этом алгебраические уравнения, отражающие связь между исследуемыми свойствами бетона и исходными факторами.

После получения уравнений производили проверку отличия коэффициентов от нуля и пригодности уравнения для описания исследуемых зависимостей (проверка адекватности).

Полученные уравнения регрессии по прочности на сжатие после ТВО и в возрасте 28 суток нормального твердения имеют вид, показанный в формулах (1) и (2).

$$R_{\text{ТВО}} = 38,2 - 1,15 \cdot X_1 + 0,35 \cdot X_2 + 1,025 \cdot X_3 - 0,75 X_1 \cdot X_2 - 1,025 X_1 \cdot X_3 + 0,175 X_2 \cdot X_3 \quad (1)$$

$$R_{28} = 48,775 + 1,825 X_1 + 2,125 X_2 + 2,175 X_3 - 0,225 X_1 X_2 + 0,125 X_1 X_3 - 1,575 X_2 X_3 \quad (2)$$

Анализируя уравнения регрессии по прочности на сжатие после ТВО и в возрасте 28 суток нормального твердения позволило провести некоторый интерполяционный анализ относительно влияния каждого из компонентов (факторов) или их взаимодействия на свойства бетона и сделать следующие выводы по механизму их действия на структуру бетона и на свойства прочности в целом.

За счет большой удельной поверхности (от 50 до 500 м²/г) наночастицы аморфного кремнезема SiO₂ активизируют реакции гидратации силикатов кальция и образование гидратов типа C-S-H. Введение относительно небольшого количества наночастиц от массы цемента приводит к появлению в системе цемент-песок-вода дополнительный значительный по площади реакционно-активной поверхности. Пуццоланический эффект действия аморфного нанокремнезема в бетонах проявляется химическим взаимодействием активного кремнезема с гидроксидом кальция Ca(OH)₂, выделяющимся при гидратации портландцемента. В результате такой пуццоланической активности наночастицы участвуют в реакциях, приводящих к расходованию Ca(OH)₂ и образованию дополнительно количества гидросиликатов кальция типа C-S-H. Наночастицы могут влиять на объемные пропорции трех разновидностей C-S-H: с высокой, ультравысокой и низкой плотностью, повышая объемную долю разновидностей C-S-H с высокой плотностью, что способствует увеличению плотности и прочности бетона.

В результате химической реакции между кремнеземом белой сажи и известью Ca(OH)₂ создается эффект заполнения больших пор. Пуццолановая реакция приводит к преобразованию более плотной фазы извести СН и ее крупных пор в менее плотной фазе C-S-H. Таким образом, происходит превращение фаз с большими порами в системе портландцементного камня в продукты с небольшими порами, что является наиболее логичным объяснением увеличения плотности и прочности бетона.

Микрокремнезем является пуццолановой добавкой с высокой гидравлической активностью, которая ускоряет химически реакции гидратации цемента в начальный период твердения и приводит к возникновению структурно-топологического эффекта (уменьшение порообразования в цементном камне и достижение более высокой плотности цементного камня и контактной зоны).

Применение нанодобавок совместно с суперпластификатором обеспечивает получение суммарного эффекта, который проявляется в повышении уплотнения и упрочнения структуры мелкозернистого бетона, результатом чего является получение высокопрочных и высококачественных мелкозернистых бетонов.

Совокупность существенных признаков влияния нанодобавок проявляется в свойства, которые обеспечивают повышение гидратационной

активности компонентов бетонной смеси и образование структуры мелкозернистого бетона с плотной, прочной упаковкой.

Таким образом, образование плотной структуры мелкозернистого бетона за счет пуццоланического эффекта аморфного кремнезема, содержащегося в нанодобавках и, как следствие, повышение гидратационной активности компонентов бетонной смеси позволяет получить наномодифицированный мелкозернистый бетон, отличающийся повышенной прочностью при сжатии и долговечностью.

Литература

1. Технология бетона. Учебник. Ю.М. Баженов - М.: Изд-во АСВ, 2007 - 528с.
2. Руководство по подбору составов тяжелого бетона / НИИЖБ.-М.: Стройиздат, 1979.- 103с., ил.
3. Шабанов Н.А., Саркисов П.Д. Основы золь-гель технологии нанодисперсного кремнезема.- М.: ИКЦ "Академкнига", 2004.- 208с.

УДК 621.863

ВЛИЯНИЯ КРАЕВЫХ ШПАНГОУТОВ НА ПРОГИБ СТЕНКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

Фидровская Н.Н.

Украинская инженерно-педагогическая академия, г. Харьков, Украина

Прогиб цилиндрической оболочки определен с учетом влияния жесткости заделки краев. При этом дается решение оболочки, нагруженной неравномерным внешним давлением.

Задача определения изгиба цилиндрической оболочки является достаточно сложной, над решением которой работали многие известные ученые, такие как В.З. Власов [1], С.Н. Кан [2], и др.

Теория расчета тонкостенных пространственных систем, разработанная В.З. Власовым, получила большое распространение и позволила определить напряженное состояние различных конструкций при небольших показателях изменяемости нагрузки.

Для более сложных нагрузочных схем вводились дополнительные условия и допущения, например, такие как отсутствие сдвигов в срединной тонкостенной конструкции и нерастяжимости оболочки в окружном направлении.

Имеющиеся решения получены для бесконечных оболочек, хотя влияние концов может быть значительным, особенно это касается коротких оболочек.

В реальных конструкциях краевые шпангоуты могут иметь конечную жесткость и в этом случае расчет на прочность оболочки должен это учитывать.