

Оптимизация состава модифицированного бетона на основе заполнителей из бетонного лома

И.О. Егорочкина, И.А. Серебряная, А.А. Сукиасян, А.К. Тупчиев

Донской государственной технической университет

Аннотация: Представлены результаты оптимизации состава бетона на основе заполнителей из дробленого бетона. С помощью математического и натурного моделирования подобран состав расширяющей добавки сульфоалюминатного типа, установлено оптимальное процентное соотношение компонентов модифицированного цемента, требуемое для получения материала с улучшенными эксплуатационными свойствами, получены математические модели строительно-технических свойств бетона и кинетика их изменения с учетом временного фактора и силовых и атмосферных воздействий. Проведена лабораторная и производственная апробация.

Ключевые слова: Строительно-технические свойства, расширяющая добавка, математическое моделирование, факторный эксперимент, влияющие факторы, уровень варьирования, матрица планирования эксперимента.

Сегодня во всем мире накоплен значительный опыт использования при производстве бетонных и железобетонных конструкций заполнителей с разномодульными включениями низкой жесткости, например дробленый бетон, кирпич, раствор, керамзитовый гравий и т.п. [1-3].

Известно, что наличие низко модульных пористых включений повышает водопотребность бетонных смесей и как следствие, увеличивает усадку материалов, что приводит к снижению основных параметров качества [4,5]. Удаление таких включений, как правило, является сложным и экономически нецелесообразным. Исследователи предлагают перенаправить усилия с очистки заполнителя от разномодульных включений на разработку технологий по компенсации негативного их влияния, например использованием расширяющихся и безусадочных цементов [6,7].

С целью компенсации усадки в бетонах на разномодульных заполнителях представляется целесообразной модификация портландцемента расширяющими добавками взамен применения дорогостоящих расширяющихся цементов промышленного производства.

Целью настоящей исследовательской работы является оптимизация состава бетона на основе заполнителей с разномодульными включениями с помощью математического и натурного моделирования, подбор состава конструкционного бетона с улучшенными эксплуатационными характеристиками и исследование его свойств с помощью методов математического и натурного моделирования.

Методы математического моделирования широко используются в исследовательской деятельности [8,9], позволяют оптимизировать вещественный состав, управлять формированием структуры и соответственно свойствами исследуемых материалов, устанавливать зависимость основных параметров качества от различных влияющих факторов и прогнозировать кинетику их изменения во времени и под нагрузками.

Нами изучена возможность разработки составов и исследования свойств бетонов, модифицированных расширяющей добавкой сульфоалюминатного типа с заполнителями из дробленого бетона. Составы разработаны с применением портландцемента, модифицированного расширяющей добавки сульфоалюминатного типа, подбор состава которой представлен в работе [10], песка с модулем крупности $M_k = 1,48$ и крупным заполнителем из дробленого бетона. Рекомендации по подбору вещественного состава бетона представлены в работе [11].

С целью получения обобщенных зависимостей основных показателей качества от влияющих факторов применялись методы математического моделирования. В качестве исследуемых факторов были рассмотрены:

X_1 – В/Ц отношение – 0,4-0,6;

X_2 – коэффициент раздвижки зерен заполнителя – 1,1 – 1,6;

X_3 – содержание дробленого бетона, % от объема природного щебня – 2-

34;

X_4 – содержание расширяющей добавки, % от массы цемента – 0-20;

X_5 – время твердения в воде, сутки – 4-28.

Уровни варьирования В/Ц отношения приняты из условия получения конструкционных бетонов различных классов от В20 до В55, для которых используются бетонные смеси с В/Ц отношением 0,4 – 0,6. Как известно, оптимальное соотношение заполнителей в бетоне, при одинаковом качестве и количестве цементного теста, определяется показателем раздвижки зерен заполнителя α . Достижение максимального насыщения объема бетона заполнителем и формирование структуры с контактной цементацией возможно в случае $\alpha = 1,1$. В случае повышения показателя до значения 1,6 предполагается формирование структуры бетона с поровой или базальной цементацией. Варьирование фактора в пределах 1,1-1,6 позволит выявить влияние концентрации низкомодульных включений на изменение свойств бетона при переходе от одного вида структуры к другому.

Обоснование вариации содержания низкомодульных включений в составе крупного заполнителя приводится в исследовательских работах [12-13] и ограничивается уровнем 35%. Для уменьшения негативного влияния последствий собственных деформаций посредством их регулирования, в исследовании, как было указано выше, использован цемент, модифицированный расширяющей добавкой, концентрация которой назначалась с учетом получения бетонов с компенсированной усадкой. По данным в пункте [14] введение добавки в количестве 10-20 % является достаточным для компенсации усадочных деформаций и получения материала с улучшенными эксплуатационными свойствами.

Значительное влияние на формирование структуры и свойств, бетонов оказывают условия его твердения (водное, воздушно-сухое и проч.).

Общеизвестны потенциальные возможности расширяющих цементов при обеспечении влажностного ухода набирать проектную прочность в сокращенные сроки, а в случае использования пористых низко модульных включений, без организации водного ухода, за счет самовлагообеспечения.

С учетом вышеизложенного предполагается, что введение расширяющей добавки в количестве до 20 % позволит сократить время влажностного ухода за бетоном, поэтому в план проведения экспериментов включен фактор, учитывающий степень «зрелости» бетона к моменту окончания водного выдерживания.

В качестве откликов были выбраны основные механические характеристики бетона: Y_1 - прочность при сжатии ($R_{сж}$, МПа), Y_2 – призмная прочность ($R_{пр}$, МПа), Y_3 – прочность при растяжении (R_t , МПа), Y_4 – прочность при изгибе (R_f , МПа).

В исследовательской работе реализован факторный эксперимент по плану Хартли-5 (Ha-5). Количество точек плана – 27. Количество точек в центре плана -1. Количество коэффициентов в полиноме второго порядка с пятью факторами равно 21. Анализ плана Ha-5 проводился с помощью статистического пакета Matcad. Дисперсия воспроизводимости определялась по результатам параллельных опытов в каждой точке плана.

В результате математической обработки экспериментальных данных получены адекватные модели изучаемых функций отклика.

Основным критерием возможности применения заполнителей с низко модульными включениями, такими как дробленый бетон, раствор, керамзит, кирпичный бой и т.п. в качестве заполнителя конструкционного бетона является прочность на сжатие образцов-кубов в 28 суточном возрасте. Коэффициенты экспериментально-статистических моделей функций отклика основных механических характеристик бетона представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Коэффициенты уравнений регрессии вида

$$Y = B_0 + \sum B_i X_i + \sum B_{ii} X_i^2 + \sum B_{ij} X_{ij}$$

Коэффициенты	Функция отклика			
	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄
B ₀	62,5	50,14	3,09	5,76
B ₁	-10,7	-5,7	-0,19	-0,75
B ₂	0,014	-0,92	-0,06	-0,26
B ₃	-0,5	0,98	0,034	-0,15
B ₄	-0,63	-1,48	-0,07	-0,1
B ₅	3,26	1,76	0,05	0,28
B ₁₁	-1,92	-0,79	0,08	-0,1
B ₂₂	-5,72	-2,94	0,04	-0,1
B ₃₃	-3,7	-2,68	-1,11	0,2
B ₄₄	2,71	-1,23	0,01	-0,2
B ₅₆	3,55	0,99	-0,14	0,3
B ₁₂	-0,43	0,63	-0,05	-0,45
B ₁₃	-0,14	1,07	-0,12	0,14
B ₁₄	0,69	0,03	-0,1	0,24
B ₁₅	2,13	2,88	0,09	-0,02
B ₂₃	-0,77	-0,48	0,1	0,1
B ₂₄	0,14	1,21	0,03	0,04
B ₂₅	0,54	0,73	-0,1	0,05
B ₃₄	0,2	-0,13	0,04	0,07
B ₃₅	-2,1	-1,88	0,04	0,09
B ₄₅	0,15	-0,8	0,02	0,04

По уравнениям регрессии методами линейной алгебры были построены геометрические образы изучаемых функций отклика. Анализ геометрических образов исследуемых функций отклика позволил установить оптимальные пределы варьирования основных входных параметров для получения бетонов с компенсированной усадкой с разномодульными включениями. Анализ подобластей факторного пространства позволил рекомендовать концентрацию содержания расширяющей добавки сульфоалюминатного типа в пределах 8-12 %, низко модульных включений не более 34-35 %. Установлены оптимальные для различных производственных целей параметры бетонной смеси и

степень зрелости бетона к моменту окончания водного выдерживания.

В исследовательской работе выявлена высокая эффективность методов математического и натурного моделирования для целей направленного структурообразования и формирования предпочтительных свойств конструкционных бетонов, что является определенным вкладом в развитие инновационных направлений ресурсосбережения, обогащения сырьевой базы, улучшения экологической обстановки за счет эффективного использования промышленных отходов.

Литература

1. Mirjana Malešev, Vlastimir Radonjanin and Snežana Marinković. Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production // Sustainability, 2010, № 2, pp. 1204-1225. DOI: 10.3390/su2051204.
2. Sherif Yehia, Kareem Helal, Anaam Abusharkh, Amani Zaher, and Hiba Istaitiyeh. Strength and Durability Evaluation of Recycled Aggregate Concrete / International Journal of Concrete Structures and Materials, Vol.9, № 2, pp. 219–239. DOI 10.1007/s40069-015-0100-0.
3. Курочка, П.Н., Мирзалиев, Р.Р. Свойства щебня из продуктов дробления вторичного бетона как инертного заполнителя бетонных смесей // Инженерный вестник, 2012, № 4, ч.2. - URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1441
4. Kwan, W. H., Ramli, M., Kam, K. J., & Sulieman, M. Z. Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. Construction and Building Materials, 2012, № 26 (1), pp. 565–573. DOI 10.1155/2013/842929
5. Несветаев, Г.В., Долгова, А.В. Влияние дозировки редиспергируемых порошков и типа низко модульных включений на свойства мелкозернистого бетона. // Вестник Дагестанского государственного

технического университета. Технические науки, 2019, Т. 46, № 2, С. 167-175.

6. Звездов, А.И., Титов, М.Ю. Бетоны с компенсированной усадкой для возведения трещиностойких конструкций большой протяженности. // Бетон и железобетон, 2001, № 4, С. 17-20.

7. Егорочкина, И.О., Серебряная, И.А., Шляхова, Е.А., Матросов, А.А., Пронина, К.А., Кузина, А.Н. Исследование структуры контактной зоны в бетонах с комбинированными заполнителями. // Инженерный вестник Дона, 2019, № 4. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2019/5904

8. Суханов, А. В. Математические модели, численные методы и программы для оптимизации структуры и свойств металлопродукции в многостадийных системах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18. – Липецк, 2020. – 16 с.

9. Питерский, А.М. Оптимизация решений задач водохозяйственного строительства. – Новочеркасск: НИМИ, 1995. – 115 с.

10. Ефремова, И.А. Бетоны с комбинированным заполнителем на основе портландцемента с расширяющими добавками: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. - Ростов-н/Д, 1997. – 18 с.

11. Егорочкина, И.О. Рекомендации по подбору состава бетонов на вторичных заполнителях с разномодульными включениями // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2014, № 3. С. 49-54.

12. Муртазаев, С-А. Ю., Саламанова, М.Ш., Гишлакаева, М.И. Формирование структуры и свойств бетонов на заполнителе из бетонного лома // Бетон и железобетон, 2008, № 5. С. 25-28.

13. Егорочкина, И.О. Структура и свойства бетонов с компенсированной усадкой на вторичных заполнителях: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.23.05. - Ростов-н/Д, 1998. – 26 с.

14. Титов, М.Ю. Бетоны с компенсированной усадкой на расширяющих добавках: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05, 2012. – 24 с.

Reference

1. Mirjana Malešev, Vlastimir Radonjanin and Snežana Marinković. Sustainability, 2010, No. 2, pp. 1204-1225. DOI: 10.3390/su2051204.
2. Yehia Sh., Helal K., Abusharkh A, Zaher A. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2015, № 2, pp. 219–239. DOI 10.1007/s40069-015-0100-0.
3. Kurochka, P. N., Mirzaliev, R. R. Inzhenernyj vestnik Dona, 2012, № 4, ch.2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1441.
4. Kwan, W. H., Ramli, M., Kam, K. J., & Sulieman, M. Z. Construction and Building Materials, 2012, № 26 (1), pp. 565–573. DOI 10.1155/2013/842929
5. Nesvetaev, G. V., Dolgova, A.V. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki, 2019, T.46, № 2, pp. 167-175.
6. Zvezdov, A. I., Titov, M. Yu. Beton i zhelezobeton, 2001, № 4, pp. 17-20.
7. Egorochkina, I. O., Serebryanaya, I. A., Shlyakhova, E. A., Matrosov, A. A., Pronina, K. A., Kuzina, A. N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, № 4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2019/5904.
8. Sukhanov, A.V. Matematicheskie modeli, chislennye metody i programmy dlya optimizacii struktury i svojstv metalloprodukcii v mnogostadijnyh sistemah [Mathematical models, numerical methods and programs for optimizing the structure and properties of metal products in multi-stage systems]: diss. ... kand. tehn. nauk: 05.13.18. Lipetsk, 2020. 16 p.
9. Pitersky, A.M. Optimizaciya reshenij zadach vodohozyajstvennogo stroitel'stva [Optimization of solutions to problems of water construction]. Novoчеркассk: NIMI, 1995. 115 p.

10. Efremova, I. A. Concrete with combined aggregates on the Portland cement with expanding additives [Betony` s kombinirovanny`m zapolnitelem na osnove portlandcementsa s rasshiryayushhimi dobavkami].: diss. ... kand. tehn. nayk.: 05.23.05. - Rostov-on-Don, 1997.- 18 p.
11. Egorochkina, I. O. Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura, 2014. № 3. pp. 49-53.
12. Murtazaev, S.A.-Yu., Salamanova, M.Sh., Gishlakaeva, M.I. Beton i zhelezobeton, 2008, № 5, pp. 25-28.
13. Egorochkina I.O. Structure and properties of concretes with compensated shrinkage and reused aggregates. [Struktura i svojstva betonov s kompensirovannoj usadkoj na vtorichny`x zapolnitelyax]: dis. ... kand. teh. nayk: 05.23.05. - Rostov-on-Don, 1998. - 26 p.
14. Titov, M. Y. Concrete with shrinkage compensated on expanding additives [Betony s kompensirovannoj usadkoj na rasshiryayushchih dobavkah]: diss. ... kand. tehn. nayk.: 05.23.05, Moscow, 2012. - 24 p.