УДК 691.327

ОПТИМИЗАЦИИ РЕЦЕПТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ДЕКОРАТИВНОГО БЕТОНА ДЛЯ ТРОТУАРНЫХ НАСТИЛОВ

Шашин Д.С., Сланевский С.И., Воронов Ю.Н.

Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса

Для повышения архитектурной выразительности зданий и сооружений широкое распространение получили декоративные бетоны.

Бетон – материал, которому могут быть приданы хорошие декоративные и пластические свойства. Декоративность в бетоне создают введением различных видов пигментов и заполнителей. Пластичность бетонной смеси позволяет придать бетонным изделиям различную конфигурацию, формовать изделия с рельефной поверхностью, изготавливать различные декоративные элементы зданий и сооружений. Вместе с тем, декоративные бетоны по физико-механическим свойствам, долговечности, сопротивлению воздействия агрессивных сред, как правило, значительно уступают изделиям из природного камня.

Настоящая работа посвящена обобщению и анализу результатов трех однотипных экспериментов, отличающихся крупностью заполнителя, в которых решалась задача оптимизации рецептурно-технологических параметров приготовления декоративного бетона для тротуарных настилов. Критерием оптимизации было принято компромиссное решение, при котором максимально высокие качественные показатели бетона достигаются при минимальном расходе цемента.

Решали поставленную задачу с помощью объединения ранее реализованных 3-х двухфакторных экспериментальных планов в один 3-факторный D-оптимальный экспериментальный план Бокса-Бенкина типа В-3, по результатам которого определяли оптимальные рецептурно-технологические параметры приготовления декоративного бетона.

В качестве независимых переменных были приняты: X_1 - водоцементное отношение (0,3-0,34), X_2 - расход воды (220-240 л/м^3) и X_3 предельная крупность зерен заполнителя 5, 10 и 20 мм. При этом обеспечение равенства интервалов в факторе X_3, как одного из обязательных требований в теории планирования экспериментов, решалось с помощью логарифмирования значений предельной крупности зерен заполнителя.

В качестве исходных сырьевых материалов использовали: цемент М-400 Одесского цементного завода, гранитный щебень фракции 5-40 мм Трикратновского месторождения, пигмент в виде железного сурика и водопроводную воду. Содержание пигмента в эксперименте было принято постоянным и составляло 4 % от массы цемента.

Технология проведения экспериментальных работ была следующей. Дробили и рассевали на фракции щебень. Исходные компоненты дозировали в соответствии с матрицей планирования эксперимента и перемешивали до достижения гомогенного состояния.

Из полученной бетонной смеси формовали образцы-кубы с размером ребра 10 см. После одночасовой предварительной выдержки, необходимой для уменьшения деструктивных процессов, формы помещали в пропарочную камеру и подвергали гидротермальной обработке по режиму: 3 часа – разогрев бетона до температуры 90ºС + 6 часов – изотермическая выдержка + 4 часа – остывание форм в приоткрытой камере до температуры 40ºС.

После гидротермальной обработки образцы распалубливали, сушили в шкафу при температуре 100-110ºС до постоянной массы и, после остывания до температуры окружающей среды, подвергали испытаниям, в результате чего определяли прочность на растяжение при изгибе, прочность при сжатии, водопоглощение, определяемое как отношение массы воды, поглощенной в бетон к массе сухого бетона, и коэффициенты размягчения по стандартным методикам. Объёмное водопоглощение, определяли как отношение объема воды, поглощенного в бетон, к общему объему пор в бетоне.

Воздухововлечение определяли аналитическим методом, как разность между общей пористостью и пористостью, образовавшейся в результате испарения воды, не вступившей в реакцию с цементом. При этом содержание воды, вступающее в реакцию с цементом было принято, исходя из литературных источников, равное 15 % от массы цемента.

Матрица планирования эксперимента с расходами составляющих и свойствами бетона приведены соответственно в табл. 1 и табл. 2. Приведенные результаты свидетельствуют о том, что бетон обладает достаточно высокими физико-механическими свойствами. Так прочность на сжатие изменяется от 88 до 105 МПа; прочность на растяжение при изгибе – от 7,4 до 11 МПа; коэффициенты размягчения: по прочности на сжатие – от 0,8 до 1 и по прочности на растяжение при изгибе – от 0,6 до 1; водопоглощение – от 7,1 до 14,7 %; воздухововлечение – от 2,2 до 9,2 %; общая пористость – от 14,1 до 20,4 %; степень заполнения пор водой – от 47 до 72 %.

Таблица 1

Матрица планирования эксперимента и расходы составляющих декоративного бетона

№ п/п	Факторы			Параметры состава			Состав бетона, кг/м^3			
	В/Ц	В	D_{max}							
	X_1	X_2	X_3	В/Ц	В, л/м^3	D_{max}	Цемент	Заполнитель	Пигмент	Вода
1	-	-	-	0,3	220	5	733	1456	29,3	220
2	+	-	-	0,34	220	5	647	1531	25,9	220
3	-	+	-	0,3	240	5	800	1345	32,0	240
4	+	+	-	0,34	240	5	705	1426	28,2	240
5	-	-	+	0,3	220	20	733	1456	29,3	220
6	+	-	+	0,34	220	20	647	1531	25,9	220
7	-	+	+	0,3	240	20	800	1345	32,0	240
8	+	+	+	0,34	240	20	705	1426	28,2	240
9	-	0	0	0,3	230	10	767	1401	30,7	230
10	+	0	0	0,34	230	10	676	1479	27,0	230
11	0	-	0	0,32	220	10	688	1496	27,5	220
12	0	+	0	0,32	240	10	750	1388	30	240
13	0	0	-	0,32	230	5	718	1442	28,7	230
14	0	0	+	0,32	230	20	718	1442	28,7	230
15	0	0	0	0,32	230	10	718	1442	28,7	230

Полученные результаты обрабатывали на ЭВМ по специальным программам, в результате чего рассчитывали коэффициенты математических моделей, представленные в табл. 3.

Для наглядности и облегчения технологической интерпретации полученных результатов по математическим моделям исследуемых свойств, используя ЭВМ, построены диаграммы зависимости исследуемых свойств от В/Ц и расхода воды, отражающие степень и характер влияния каждого из рассматриваемых факторов, а также корреляционные зависимости исследуемых свойств от прочности бетона, характеризующие собой взаимосвязь и взаимозависимость свойств.

Диаграммы свойств, представленные в виде поверхности, представляют собой семейство сечений объемных фигур. Для математической модели второго порядка такими фигурами являются эллиптический или гиперболический параболоиды. Так на диаграммах прочности бетона в сухом состоянии поверхности имеют вид эллиптического параболоида.

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента и исследуемые свойства декоративного бетона

№ п/п	Прочность, МПа				Коэффициент размягчения		Водопоглощение по массе, %	Водопоглощение, % от объема пор	Воздухововлечение, %	Общая пористость, %
	на сжатие		на растяжение							
	в сухом состоянии	в водонасыщенном состоянии	в сухом состоянии	в водонасыщенном состоянии	по сжатию	по размягчению				
1	93,8	93,5	9,73	8,09	1,00	0,8	9,4	57,7	5,3	16,3
2	98,1	89,8	9,35	7,14	0,92	0,8	9,3	55,4	4,5	16,8
3	99	97,1	9,03	7,28	0,98	0,8	10,3	59,5	5,5	17,3
4	96,5	88,8	9,36	6,01	0,92	0,6	9,9	55,9	4,5	17,7
5	101	81,5	7,81	6,32	0,81	0,86	14,7	72,1	9,2	20,4
6	102	87,0	8,52	6,93	0,85	0,84	7,1	47,3	3,0	15,0
7	100	87,9	8,86	7,06	0,88	0,8	7,6	53,9	2,2	14,1
8	88	81,4	7,40	6,29	0,93	0,84	9,6	61,1	3,1	15,7
9	104,5	102,5	10,49	8,42	0,98	0,8	7,5	51,0	3,3	14,7
10	91,5	94,1	7,68	8,05	1,03	1,0	8,0	54,1	3,1	14,8
11	97,9	85,5	9,65	7,75	0,87	0,8	7,7	52,7	3,35	14,6
12	96,3	89,4	10,02	7,8	0,93	0,8	8,1	54,7	2,85	14,8
13	103,4	86,2	10,96	7,53	0,83	0,7	9,8	53,0	6,1	18,5
14	94	88,6	7,89	6,19	0,94	0,78	8,0	51,6	3,1	15,5
15	86	84,3	7,76	6,54	0,97	0,9	8,2	56,2	2,9	14,6

Таблица 3

Коэффициенты математических моделей исследуемых свойств

Наименование коэффициентов	Исследуемые свойства декоративного бетона									
	Прочность бетона, МПа				Коэффициенты размягчения		Водопоглощение, %	Воздухововлечение, %	Общая пористость, %	Степень насыщения бетона водой, %
	На сжатие		На растяжение							
	Всухом состоянии	В водонасыщенном состоянии	Всухом состоянии	В водонасыщенном состоянии	По Rсж	По Rи				
B0	91,85	88	8,68	7,19	0,956	0,866	7,84	3,00	14,73	53,53
B1	-2,22	-2,19	-0,36	-0,23	0,000	0,002	-0,56	-0,73	-0,28	-2,04
B2	-1,3	0,68	-0,04	-0,18	0,019	-0,026	-0,27	-0,72	-0,35	-0,01
B3	-0,58	-2,85	-0,8	-0,33	-0,024	0,042	-0,17	-0,53	-0,59	0,45
B12	-2,48	-2,14	-0,18	-0,21	0,004	-0,017	1,16	0,86	0,86	3,84
B13	-1,6	1,44	-0,09	0,26	0,029	0,027	-0,64	-0,44	-0,59	-1,46
B23	-2,33	-0,16	0,08	0,26	0,021	0,017	-0,76	-0,89	-0,94	-0,84
B11	2,21	7,58	-0,28	0,55	0,059	0,060	0,18	0,13	-0,08	0,97
B22	1,31	-3,27	0,47	0,09	-0,046	-0,040	0,33	0,03	-0,13	2,12
B33	2,91	-3,32	0,06	-0,82	-0,061	-0,100	1,33	1,53	2,17	0,72

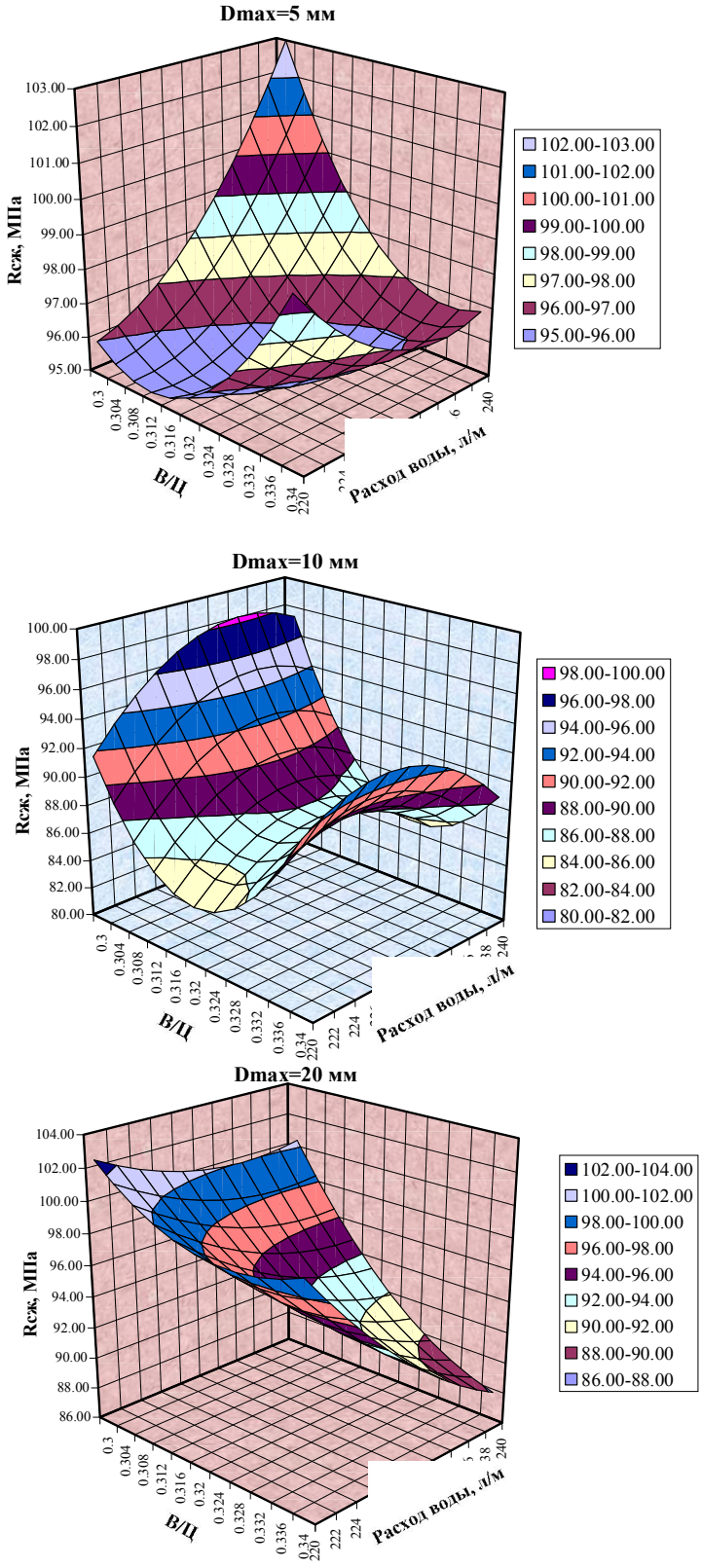

Рис. 1. Изопараметрические диаграммы изменения прочности декоративного бетона в исследуемом факторном пространстве

По диаграммам можно проследить степень и характер влияния каждого из рассматриваемых факторов на заданное свойство. Так из диаграммы прочности бетона в сухом состоянии видно, что наибольшая степень влияния факторов наблюдается в крупнозернистом бетоне с предельной крупностью щебня 20 мм. Изменение выбранных факторов от минимального до максимального значений приводит к изменению прочности бетона на 14 МПа, а именно – от 102 до 88 МПа. Со снижением предельной крупности зерен заполнителя наблюдается понижение степени влияния факторов. Так при предельной крупности зерен 10 и 5 мм диапазон изменения

прочности бетона соответственно составляет 10 и 8 МПа.

Как и следовало ожидать, при всех предельных крупностях зерен заполнителя с повышением В/Ц наблюдается понижение прочности. Однако степень влияния этого фактора зависит от расхода воды и с повышением расхода воды повышается. При низких расходах воды степень влияния В/Ц ниже, а при высоких – выше.

Характер влияния расхода воды на прочность бетона также неоднозначен и в значительной степени зависит как от В/Ц, так и от крупности заполнителя. Так для заполнителя с крупностью 5 и 10 мм при низком В/Ц с повышением расхода воды наблюдается повышение прочности, а при D_{max}=20 мм – некоторое её понижение. При высоком водоцементном отношении во всех случаях с повышением расхода воды наблюдается некоторое понижение прочности.

По диаграммам также можно определить в какой области изменения каждого из рассматриваемых факторов достигается интересующее нас максимальное или минимальное значение исследуемого свойства. Так максимальная прочность бетона с предельной крупностью зерен заполнителя 5 и 10 мм достигается при высоком расходе воды, а при крупности 20 мм – при низком расходе воды, что объясняется разницей в степени уплотнения бетона вследствие изменения водопотребности заполнителя.

По диаграммам трёхфакторного экспериментального плана можно определить оптимальные комбинации уровней варьирования факторов для заданного значения свойства, если диаграммы построены с достаточно мелким шагом. Однако, определение оптимальных комбинаций уровней варьирования факторов для многофакторных планов сопряжено с высокой трудоемкостью и очень проблематично. В этих случаях оправдано применение аналитических методов.

Как степень, так и характер влияния рассматриваемых факторов на прочность бетона в водонасыщенном состоянии значительно отличаются от прочности бетона в сухом состоянии. В этом случае поверхности имеют вид гиперболического параболоида. При всех предельных крупностях зерен заполнителя с повышением В/Ц вначале наблюдается снижение прочности, а затем некоторое её повышение, а с повышением расхода воды – вначале некоторое повышение, а затем снижение. При этом максимальная прочность во всех случаях достигается при низком В/Ц и повышенном расходе воды.

Аналогичную технологическую интерпретацию можно также сделать и по другим диаграммам.

Корреляционные зависимости, построенные на ЭВМ, характеризуют собой взаимосвязь между прочностью на сжатие и остальными свойствами. Причем по каждому свойству построено 4 корреляционных зависимости – три для предельной крупности заполнителя 5, 10 и 20 мм и одна общая. Отличительной особенностью этих зависимостей является то, что они построены по теоретическим значениям свойств, соответствующим оптимальным значениям исследуемых факторов. При этом Excel-ем предусмотрена статистическая обработку коррелируемых свойств с построением 6-ти типов математических моделей: линейной, логарифмической, полиномиальной, степенной, экспоненциальной и линейно ориентированной.

Из 6-ти математических моделей при помощи критерия адекватности, в качестве которого используется величина достоверности апроксимации R^2, в каждом конкретном случае определяется математическая модель наиболее адекватно описывающая данную корреляционную зависимость. В нашем случае для всех свойств наиболее адекватной оказалась полиномиальная модель 6-го порядка. На каждом графике, кроме точек, соответствующих показателю исследуемого свойства и соединяющей их плавной кривой, приведены математическая модель, величина достоверности апроксимации и так называемая линия тренда, т.е. линия, построенная по выбранной математической модели.

В корреляционных зависимостях обращает на себя внимание относительно высокая степень корреляции по каждой предельной крупности заполнителя и низкая степень корреляции общей зависимости исследуемых свойств от прочности бетона.

Оптимизация рецептурно-технологических параметров бетона производилась на ЭВМ по специально разработанной программе, используя математическую модель прочности бетона. Программой предусмотрена возможность оптимизации всех факторов одновременно, ранжируя их по степени значимости, например по удельной стоимости каждого компонента в 1 $м^3$ бетона. В нашем случае программе были заданны такие исходные условия, при которых, для заданной прочности бетона, определялись в первую очередь максимальное В/Ц, как параметр обеспечивающий минимальный расход цемента и во вторую - максимальный расход воды, как параметр, обеспечивающий минимально возможное содержание твердых компонентов, в том числе и цемента. Причем оптимизация проводилась для всех трёх предельных крупностей зерен заполнителя - 5, 10 и 20 мм (табл. 4).

Программой предусмотрено последовательное определение оптимальных составов, начиная от заданного минимального до максимального значений свойства с заданным шагом. При этом, программа предусматривает также параллельное определение абсолютного минимального и максимального значений свойства.

В нашем случае определялись оптимальные рецептурно-технологические параметры для семейства значений прочности бетона с шагом 1 МПа. Используя оптимальные рецептурно-технологические параметры и математические модели других свойств, определяли соответствующие их значения.

Таблица 4

Оптимальные рецептурно-технологические параметры приготовления декоративного бетона для заданной прочности

Натуральные значения факторов			Оптимальный состав бетона, кг/м^3			Заданная прочность бетона и соответствующие исследуемые свойства						
В/Ц	В, л/м^3	D_{max}	Цемент	Заполнитель	Вода	Rсж, МПа	Rи, МПа	Kсж	Kи	Wm, %	Wv, %	ВВ, %
0.316	224	5	709	1467	224	95	9.8	0.91	0.74	9.3	54.7	5.1
0.332	237		714	1428	237	96	9.3	0.9	0.67	10.4	57.1	5.4
0.326	240		736	1400	240	97	9.7	0.87	0.63	10.5	56.5	5.4
0.318	240		755	1384	240	98	9.9	0.87	0.65	10.0	54.5	5.2
0.308	237		769	1380	237	99	9.8	0.93	0.72	9.4	54.4	5.0
0.304	237		780	1371	237	100	9.8	0.95	0.74	9.2	58.4	5.0
0.34	240	10	706	1427	240	89	8.3	0.99	0.84	8.7	58.4	2.6
0.33	240		727	1408	240	90	8.8	0.95	0.81	8.2	56.8	2.4
0.324	240		741	1396	240	91	9.0	0.93	0.80	8.0	56.1	2.3
0.318	237		745	1401	237	92	8.9	0.95	0.83	7.8	54.5	2.5
0.314	237		755	1392	237	93	9.0	0.95	0.84	7.8	54.5	2.6
0.310	236		761	1389	236	94	9.0	0.96	0.86	7.8	54.4	2.7
0.308	238		773	1374	238	95	9.2	0.96	0.85	7.7	54.6	2.5
0.306	239		781	1364	239	96	9.3	0.96	0.85	7.6	54.8	2.4
0.304	240		789	1354	240	97	9.4	0.96	0.85	7.5	54.9	2.3
0.3	238		793	1356	238	98	9.2	1.00	0.89	7.6	54.8	2.6
0.3	240		800	1345	240	99	9.4	0.98	0.87	7.5	54.8	2.3
0.338	240	20	710	1423	240	88	7.7	0.94	0.82	8.4	57.1	2.2
0.340	237		697	1442	237	89	7.3	0.97	0.86	8.2	55.3	2.4
0.328	239		729	1410	239	90	8.1	0.89	0.78	8.3	55.8	2.4
0.324	238		735	1407	238	91	8.1	0.88	0.78	8.3	55.4	2.6
0.32	239		747	1394	239	92	8.4	0.87	0.77	8.3	55.7	2.6
0.318	236		742	14.6	236	93	8.2	0.88	0.79	8.5	55.1	3.1
0.314	240		764	1376	240	94	8.6	0.86	0.76	8.3	56.0	2.5
0.312	236		756	1394	236	95	8.3	0.88	0.79	8.7	55.6	3.3
0.310	233		752	1406	233	96	8.2	0.88	0.80	9.2	56.1	4.0
0.308	231		750	1413	231	97	8.1	0.88	0.81	9.6	56.9	4.5
0.306	230		752	1414	230	98	8.1	0.88	0.82	9.9	57.7	4.9
0.302	237		785	1366	237	99	8.5	0.90	0.82	8.9	56.7	3.5
0.3	237		790	1362	237	100	8.5	0.90	0.82	9.0	57.0	3.6
0.302	223		738	1444	223	101	8.2	0.84	0.81	11.8	62.7	6.8
0.3	222		740	1445	222	102	8.2	0.84	0.81	12.3	64.3	7.3
0.3	220		733	1456	220	103	8.4	0.82	0.79	12.9	66.0	7.8

Выводы

1. Получен высокопрочный декоративный бетон, обладающий достаточной для виброуплотнения удобоукладываемостью и высокими физико-механическими свойствами.

2. Разработана поликритериальная методика и программа оптимизации рецептурно-технологических параметров получения композиционных материалов, в том числе и декоративного бетона.

3. Определены оптимальные рецептурно-технологические параметры приготовления декоративного бетона во всем диапазоне прочности для предельной крупности заполнителя 5, 10 и 20 мм, обеспечивающие достаточно высокие эксплуатационные показатели.

SUMMARY

A generalization and analysis of three similar experiments with different aggregate size, which solved the problem of optimizing the recipe-process parameters for making decorative concrete paving decking.