

Результаты исследований механических свойств быстротвердеющих модифицированных бетонов

М.А. Бауэр¹, В.А. Дмитриенко²

*¹Шахтинский институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Южно-Российский
государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова»*

*²Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал)
Донского государственного технического университета, Шахты*

Аннотация: приведены результаты исследования скорости набора прочности модифицированных бетонов в ранние сроки твердения, используемых для крепления подземных сооружений. В результате исследований установлены наиболее эффективные добавки Д5 и РЕЛАМИКС Т-2. Состав с добавкой Д5 с заполнителями рядового качества и осадкой конуса 15 см, через 18 часов набирает прочность 6,5 МПа, а с добавкой РЕЛАМИКС Т-2 – 2,8 МПа. Полученные результаты использованы для моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтового массива и бетонной крепи некруговой формы.

Ключевые слова: проходание, крепление, состав бетона, модификатор, прочность бетона, модуль Юнга, напряжения.

Введение

В современных условиях совершенствование инженерной и транспортной инфраструктуры крупных городов невозможно без освоения подземного пространства. Поэтому объемы проходки выработок в неустойчивых породах будут расти. Строительство подземных сооружений в грунтах в большинстве случаев требует использования специальных мероприятий для упрочнения пород или применения щитовой проходки. В этом случае, затраты на строительство подземных сооружений небольшой протяженности (устья наклонных стволов, врезки тоннелей различного назначения, подземные переходы, эскалаторные ходки, подземные коллекторы, вентиляционные и технологические сбойки перегонных тоннелей) существенно возрастают.

Экономическая ситуация сложившаяся к настоящему времени в России требует радикального повышения технико-экономической эффективности строительства подземных сооружений путём освоения новых технических и технологических решений, обеспечивающих требуемые эксплуатационные

качества и сроки возведения объектов с минимальными затратами.

Исходя из этого разработана технология проходки горных выработок короткими заходками (0,3 – 0,7 м) [1], которая позволяет при креплении монолитным быстротвердеющим бетоном сразу за обнажением пород, исключить деформации и обрушения незакрепленного массива связных грунтов. Важнейшей составляющей предлагаемых технических и технологических решений проведения и крепления подземных сооружений небольшой протяженности до 100 м и глубиной заложения до 50 м короткими заходками, является применение сверхбыстротвердеющих бетонов.

Экспериментальные исследования модифицированных бетонов

Проведенные ранее исследования позволили установить, что для получения составов с высокой скоростью набора прочности в период 12 – 20 часов, наиболее эффективно использование модифицирующих добавок полифункционального действия [2 - 5]. Однако для получения высокой ранней прочности бетона требуется значительное количество модификатора Д5 (4% от массы цемента) [1], что увеличивает стоимость бетона на 10 – 14%.

В последние годы отечественными производителями освоен выпуск ряда эффективных модификаторов бетона. Поэтому в рамках научного проекта № 16-35-00328 мол_а, выполняемого при финансовой поддержке РФФИ, выполнен комплекс исследований по выявлению новых эффективных модификаторов обеспечивающих высокую скорость гидратации в ранние сроки твердения при использовании заполнителей рядового и низкого качества [6].

По результатам анализа характеристик, заявленных производителями добавок, критериями отбора для исследований приняты набор прочности в период 12 – 20 часов от момента затворения и дозировка не более 1 – 1,2% от массы цемента в пересчете на сухое вещество. При сравнительно небольших колебаниях цен на различные добавки, установившихся в последнее время, уменьшение дозировки модификатора, обеспечит снижение стоимости бето-

на. Испытания проведены со следующими модификаторами: РЕЛАМИКС М2, РЕЛАМИКС СЛ, РЕЛАМИКС Т-2, ПОЛИПЛАСТ-1МБ, СУПЕРПЛАСТ УЛЬТРА, ФЕРРОКРИТ УЛЬТРА. Дозировка добавок принималась от 0,6 до 1,2 % в соответствии с рекомендациями производителей.

Изготовление образцов кубов 100x100x100 мм из бетонной смеси производилось по ГОСТ 10180–90 (2003). Каждая серия состояла из 28 образцов, что позволяло получить требуемый объем испытываемых образцов для всех интервалов твердения бетона одного состава. Первоначально все составы готовились на высококачественных заполнителях песок кварцевый фракционированный с модулем крупности $M_{кр.} = 2,5$; щебень гранитный фракции 5-20 мм Павловского ГОК. Водоцементное отношение при расходе цемента 415 кг/м^3 , составляло 0,45. Хранение осуществлялось в специальной камере при температуре $20 \pm 1^\circ\text{C}$ и влажности не менее 80%. Испытание образцов производилось по истечении 9, 12, 18, 24, 48, 72 часа и 28 суток после приготовления смеси.

Результаты лабораторных исследований, показали, что наиболее высокую скорость гидратации портландцемента в период 12 – 20 часов обеспечивал модификатор «РЕЛАМИКС Т-2». Поэтому он и принят для детальных исследований. В результате установлено, что, несмотря на заявленные производителем сокращение времени на достижение бетоном распалубочной прочности и увеличения прочности бетона в ранние сроки (1– 2 суток) на 50% и более, получить прочность бетона такую же, как с добавкой Д5 и модулем крупности песка 2,5 можно только осадке конуса не более 1 см.

В подземном строительстве для возведения монолитной бетонной крепи чаще всего используются бетоны с осадкой конуса 12 – 18 см [7]. Поэтому для испытаний проектировались составы с осадкой конуса 15 см. Всего было исследовано три состава. В качестве контрольного принят состав с добавкой Д5. Второй состав готовился на высококачественных заполнителях песок кварцевый с модулем крупности $M_{кр.} = 2,5$; щебень гранитный фракции 5 - 20 мм.

Водоцементное отношение при расходе цемента 415 кг/м^3 , составило 0,49.

Для третьего состава использованы заполнители рядового качества: портландцемент ПЦ500Д0, Себряковского завода; песок Персияновского карьера $M_{кр.} = 1,56$; щебень Садкинского карьера фракции 5 – 20 мм. Водоцементное отношение при осадке конуса $15 \pm 0,5$ см составило 0,53. Количество цемента и добавки РЕЛАМИКС Т-2 (1% от массы цемента) для второго и третьего составов приняты одинаковыми. Полученные результаты приведены в табл. 1 и на рис. 1.

Таблица 1

Результаты исследований бетонной смеси и бетона

Время твердения, час	Прочность при сжатии, МПа составов с добавкой:		
	Д-5 (4%)	РЕЛАМИКС Т-2 (1%)	РЕЛАМИКС Т-2 (1%)
	Состав №1	Состав №2	Состав №3
6	0,47	0,24	0,21
12	2,8	1,3	1,1
18	6,4	4,1	2,8
24	11,3	7,2	5,1
30	14,1	9,6	7,3
36	16,5	12,4	9,9
42	18,3	15,5	12,7
48	19,9	17,8	15,2
54	22,1	21,4	17,1
60	24,6	24,7	20,3
66	26,7	27,8	22,9
72	28,3	29,9	24,8

В результате проведенных исследований установлено, что состав с

качественными заполнителями модифицированный РЕЛАМИКС Т-2 имеет в ранние сроки твердения прочность в 2 раза ниже чем с добавкой Д5. При использовании заполнителей рядового качества, увеличивающих водопотребность смеси, эффективность применения модифицирующей добавки еще меньше. Тем не менее при определенных характеристиках грунтов и небольшой глубине заложения выработок состав с добавкой РЕЛАМИКС Т-2 может применяться для возведения крепи из монолитного бетона.

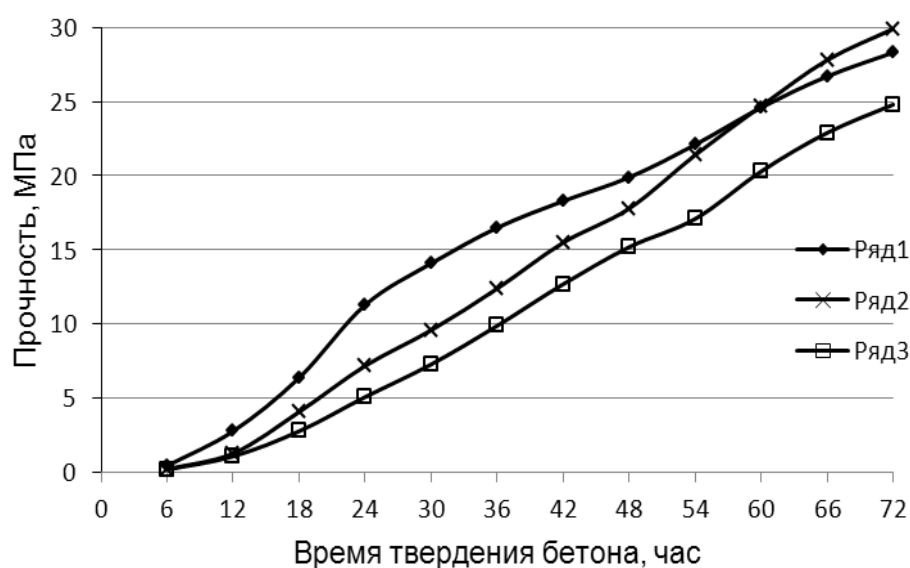


Рисунок 1. Кинетика набора прочности модифицированных бетонов:

ряд 1 - состав №1; ряд 2 - состав №2; ряд 3 - состав №3

При моделировании напряженно-деформированного состояния (НДС) крепи и массива грунта с учетом изменяющихся во времени характеристик бетона методом конечных элементов, требуется определение модуля упругости составов в различные сроки твердения.

Для определения модуля упругости модифицированных бетонов разработана специальная методика, заключающаяся в следующем. Каждая серия испытываемого состава состояла из 28 образцов. В каждой серии образцов кроме 24 кубов 100x100x100 мм предназначенных для испытаний на сжатие, изготавливались и 4 призмы 100x100x300 мм. После освобождения форм из такого же состава бетонной смеси дважды изготавливались 4 призмы и 6 ку-

бов, это позволяло получить требуемый объем испытываемых образцов для всех интервалов твердения бетона.

Деформации определялись оптическим катетометром КМ-8, обеспечивающим измерение относительных деформаций с точностью $1 \cdot 10^{-5}$ м, за счет измерения разности отметок базы на образце при его нагружении. База измерения продольных деформаций была принята 200 мм, то есть $2/3$ высоты образца.

Нагружение призм производилось ступенями одновременно на двух пружинных прессах. Число и интервал нагружений подбирались таким образом, чтобы напряжения последней ступени не превышали 50 - 60% от прочности бетона на сжатие, которое определялось по результатам испытаний в это же время 3 – 5 кубов на гидравлическом прессе. Отсчет деформаций каждой ступени нагружения производился после релаксации напряжений.

Выполненные исследования позволили по каждому интервалу твердения бетона получить значения прочности бетона на сжатие и соответствующий ей модуль упругости. Это позволило построить график зависимости модуля упругости испытанного состава с добавкой Д5 от его прочности.

Статистическая обработка результатов исследования позволила установить, что аппроксимировать одним уравнением полученные зависимости с приемлемым уровнем достоверности невозможно, поэтому было решено описать их тремя уравнениями по трем интервалам изменения прочности.

Первый интервал определяется областью самых ранних сроков твердения с прочностью до 2,0 МПа, в котором результаты испытаний аппроксимируются степенной зависимостью

$$E_1 = 525\sigma^{1,66}$$

Второй интервал характеризуется линейной зависимостью

$$E_1 = 1100\sigma - 342$$

а третий описывается уравнением

$$E_1 = 14806 \ln(\sigma) - 21542$$

где σ – прочность бетона на сжатие.

Исследование зависимости модуля упругости состава с добавкой РЕЛАМИКС Т-2 от его прочности показала хорошую сходимость с ранее полученными уравнениями регрессии для состава модифицированного Д5. Это свидетельствует о возможности их применения для расчета характеристик бетонной крепи состава с добавкой РЕЛАМИКС Т-2.

Анализируя ранее выполненные исследования моделированием НДС крепи для сооружений круговой формы [1], можно отметить, что через 18 часов после укладки бетона контрольного состава за опалубку (в момент наибольших напряжений в крепи), его прочность превышала напряжения в 3 раза. Для исследуемого состава модифицированного добавкой РЕЛАМИКС Т-2, коэффициент запаса по прочности не превышает 1,3. В этом случае требуется период времени до снятия опалубки 24 часа. Таким образом, при продолжительности проходческого цикла 12 часов и более, состав с добавкой РЕЛАМИКС Т-2 может использоваться для возведения крепи.

С целью увеличения скорости набора прочности в ранний период твердения в состав бетонной смеси вводились тонкомолотые добавки [6, 8 - 10] и фракционированный отсев продуктов дробления песчаника [8]. Также исследовано введение дополнительного ускорителя твердения, однако эти меры не привели к положительным результатам.

Заключение

Установлено существенное увеличение скорости набора прочности бетоном при повышении температуры смеси [11]. Однако увеличение температуры твердения бетона сопровождается снижением водонепроницаемости и периода живучести смеси, что в условиях крепления подземных сооружений

недопустимо.

Характеристики модифицированных бетонов, полученные в результате выполненных исследований, в настоящее время используются для оценки НДС крепи и массива грунта при моделировании подземных сооружений некругового очертания методом конечных элементов.

Литература

1. Дмитриенко В.А., Бауэр М.А. Наука и техника: монография. / отв. ред. Я.А. Максимов. – Красноярск: Научно-инновационный центр, 2011. С. 66-104.
2. Красный, И.М. О механизме повышения прочности бетона при введении микронаполнителя. // Бетон и железобетон. 1987. №5. С. 10-11.
3. Pistill, M.F. Variability of Condensed Silica Fume from a Canadian Source and Influence on the Properties of Portland Cement // Cem. Concr. and Aggr. – 1984. – V.6: - №1. pp. 33-37.
4. Setter, N., Roy, D.M. Mechanical Flatures of Chemical Shrinkage of Cement Paste. // Cem. and Concr. Res. – 1978. – V.8. - №5. pp. 623-634.
5. Vivian, H.E. Effect of Particle Size on the Properties of Cement Paste. // Symp. Structure of Portland Cement. – 1966. pp. 18-25.
6. Бутакова М.Д., Зырянов Ф.А. Исследование свойств бетонных смесей и бетонов на основе мелкозернистых минеральных отходов горного производства // Инженерный вестник Дона, 2012, №3 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/983.
7. Плешко, М.С., Крошнев, Д.В. Влияние свойств твердеющего бетона на взаимодействие системы «крепь – массив» в призабойной зоне ствола // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – №9. С. 320-325.
8. Бутакова М.Д., Зырянов Ф.А. Исследование влияние зернового состава отсеков дробления скальных пород на прочность бетонов // Межвузовский сборник научных трудов «Строительные материалы и изделия». Магнито-

горск: МГТУ, 2007. С. 146 – 152.

9. Несветаев Г.В., Та Ван Фан. Влияние белой сажи и метакаолина на прочность и деформационные свойства цементного камня // Инженерный вестник Дона, 2012, №4 (часть 1) URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1110.

10. Курочка П.Н., Гаврилов А.В. Бетоны на комплексном вяжущем и мелком песке. // Инженерный вестник Дона, 2013, №1 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1562.

11. Масленников С.А. Оценка влияния температуры на скорость набора прочности бетоном. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2010. № 9. С. 309-312.

References

1. Dmitrienko V.A., Baujer M.A. Nauka i tehnika [Science and Technology]: monografija. otv. red. Ja.A. Maksimov. Krasnojarsk: Nauchno-innovacionnyj centr, 2011. pp. 66-104.

2. Krasnyj, I.M. Beton i zhelezobeton. 1987. №5. pp. 10-11.

3. Pistill, M.F. Variability of Condensed Silica Fume from a Canadian Source and Influence on the Properties of Portland Cement. Cem. Concr. and Aggr. 1984. V.6: №1. pp. 33-37.

4. Setter, N., Roy, D.M. Mechanical Flatures of Chemical Shrinkage of Cement Paste. Cem. and Concr. Res. 1978. V.8. №5. pp. 623-634.

5. Vivian, H.E. Effect of Particle Size on the Properties of Cement Paste. Symp. Structure of Portland Cement. 1966. pp. 18-25.

6. Butakova M.D., Zyrjanov F.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus). 2012, №3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/983.

7. Pleshko, M.S., Kroshnev, D.V. Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'. 2008. №9. pp. 320-325.

8. Butakova M.D., Zyrjanov F.A. Issledovanie vlijanie zernovogo sostava ot-



sevov droblenija skal'nyh porod na prochnost' betonov. Mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov «Stroitel'nye materialy i izdelija». Magnitogorsk: MGTU, 2007. pp. 146 – 152.

9. Nesvetaev G.V., Ta Van Fan. Inženernyj vestnik Dona (Rus). 2012, №4 (part 1). URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1110.

10. Kurochka P.N., Gavrilov A.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus). 2013, №1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1562.

11. Maslennikov S.A. Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal). 2010. № 9. pp. 309-312.