

Влияние условий твердения бетона на прочностные показатели

И. И. Романенко, И. Н. Петровнина, К.А. Еlichev, В.С. Козицын

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Аннотация: Твердение бетонов в условиях строительного объекта при постоянно меняющихся температурно-влажностных условиях не обеспечивают получение заданных эксплуатационных свойств бетонных и железобетонных конструкций. Произведена оценка влияния условий твердения бетонных образцов при водоцементном отношении (В/Ц) 0,45 и твердении 28 суток. Твердение бетонных образцов происходило в условиях камеры нормального твердения (температура воздуха $T=20\pm 5^{\circ}\text{C}$, влажность $W=90\pm 2\%$), образцов в воде при полном погружении в ванну при температуре воды $T=20\pm 3^{\circ}\text{C}$ и образцов, погруженных в полиэтиленовый пакет, в условиях воздушной среды лаборатории ($T=20\pm 5^{\circ}\text{C}$). Наибольшую прочность образцы набирают при твердении полностью погруженными в воду, а наименьшую - при твердении в изоляционной оболочке из полиэтилена.

Ключевые слова: лом бетона, фракционный щебень, водоцементное отношение, условия твердения, гидратация клинкера, кинетика набора прочности, миграция влаги.

Введение

Условия твердения бетона являются основными факторами, влияющими на достижение запроектированных эксплуатационных свойств бетонных конструкций. Оптимальные условия обеспечивают условия для протекания гидратации цементного клинкера, определяют скорость набора прочности, снижают вероятность образования усадочных трещин и сохраняют достаточное количество влаги в теле бетона для повышения сопротивления трещинообразованию [1, 2]. В практической деятельности на многих строительных площадках отношение к уходу за твердением бетона негативное. Не обеспечивается температурно-влажностный режим для твердения бетона. Гидратация цементного клинкера может происходить только во влажных условиях и при наличии воды в капиллярах цементного камня. Этим и объясняется требование к созданию повышенной влажности для твердеющего бетона с целью предотвращения потери влаги за счет испарения [3-5].

Оптимальный тепло-влажностный режим твердения бетона способствует уменьшению пористости в гидратированной цементном камне,

снижению размера пор и их формы, увеличивает плотность микроструктуры бетона. Продукты гидратации заполняют межпоровое пространство, что в конечном случае благоприятно сказывается на эксплуатационных свойствах бетона даже при эксплуатации конструкций в агрессивных средах [6].

В проведенных лабораторных исследованиях оценивался наиболее приемлемый метод твердения бетонных образцов, при котором достигается наибольшая прочность на сжатие. Предложены три способа твердения: метод твердения образцов при полном погружении в воду, твердение бетона в изоляционной оболочке из полиэтилена и твердение в воздушных условиях при постоянном увлажнении всей поверхности образцов.

Материалы и методы

В исследованиях использовали ингредиенты, полученные из лома бетона марки М300 (щебень фракции 5-10мм; песок $M_{кр}=1, 6$; молотый песок из лома бетона до удельной поверхности $S_{уд}=3200\text{см}^2/\text{г}$), оценивалась возможность получения бетона с высокой прочностью и твердении при полном погружении в воду, твердении бетона в изоляционной оболочке из полиэтилена, твердении в воздушных условиях при постоянном увлажнении всей поверхности образцов.

Требуемая дисперсность материалов оценивалась методом грохочения на горизонтальных ситах. В качестве исследуемого минерального материала применяли лом бетона, прошедшего дробление через лабораторную дробилку с простым качанием щеки.

Тонкую дисперсность из лома бетона (песка) получали в лабораторной фарфоровой мельнице, загруженной шарами. Время помола составляло 5 часов. Тонину помола материала оценивали на приборе ПСХ-9 по удельной поверхности.

Приготовление бетонной смеси осуществляли в скоростном бетономесителе миксерного типа с регулируемой скоростью вращения вала

смесителя. Однородное распределение высокодисперсных компонентов в дисперсионной среде обеспечивается скоростным смесителем и последовательностью введения ингредиентов.

Средняя плотность бетонного камня и его прочность на сжатие определялась по кубическим образцам размером $100 \times 100 \times 100$ мм, высушенных до постоянной массы в сушильном шкафу при температуре $105 \text{ }^\circ \text{C}$.

Оптимальный гранулометрический состав мелкодисперсного наполнителя для растворной части бетонной смеси определялся на основе варьирования различных фракции песка и их соотношений, обеспечивающих наибольшую плотность упаковки частиц по предварительным пробам.

Основные свойства ингредиентов бетонной смеси и эксплуатационные свойства полученного бетона определялись в соответствии с требованиями ГОСТ 5802 «Растворы, методы испытаний», ГОСТ 10181-2014 «Смеси бетонные, методы испытаний», ГОСТ 10180—2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам».

Образцы бетона после уплотнения хранились 24 часа до извлечения из форм в камере нормального твердения при $(20 \pm 2) \text{ }^\circ \text{C}$ и относительной влажности воздуха 95-100%, затем производилась разопалубка. Образцы испытывались по установленной программе через 3, 7 и 28 суток хранения в условиях установленной программой испытания. За 4 часа перед испытанием образцы переносились в помещение с относительной влажностью воздуха $(65 \pm 10) \%$.

В качестве вяжущего для получения бетонных смесей использовали Вольский портландцемент марки СЕМ I 42,5N с удельной поверхностью $3100 \text{ см}^2/\text{г}$; наполнитель цементной матрицы – молотый кварцевый песок с удельной поверхностью $3400 \text{ см}^2/\text{г}$ и молотый песок из лома бетона с удельной поверхностью $3300 \text{ см}^2/\text{г}$.

Мелкий заполнитель - сурский речной песок с модулем крупности $M_{кр} = 1,83$ и песок полученный из лома бетона $M_{кр} = 1,8$. Дозировка песков в бетонную смесь осуществлялась по предварительному разделению его на фракции 2,5 - 1,25; 1,25 - 0,63; 0,63 - 0,315; 0,315 - 0,16 мм. Рассев песков по фракциям представлен в табл.1.

Таблица № 1

Гранулометрический состав песка, используемого в бетонных смесях

Песок	Остатки, %	Размер ситов, мм					Менее 0.16%	Модуль крупности $M_{кр}$
		2,5	1,25	0,63	0,315	0,16		
Лом бетона	частный	0.5	1.67	1.91	77.26	9.77	8.9	1.8
	полный	0.5	2.17	4.08	81.33	91.10		
Сурский	частный	0.03	0.52	11.00	61.90	24.80	1.75	1.83
	полный	0.03	0.55	11.55	73.45	98.25		

Было установлено, что истинная плотность крупной фракции песка (2,5-0,16), полученной из лома бетона, составляет 2635 кг/м^3 , а мелкой (1,25-0,16) – 2564 кг/м^3 . Насыпная плотность для данных фракций составляет соответственно 1581 кг/м^3 и 1599 кг/м^3 .

В качестве крупного заполнителя использовали лом бетона и железобетона после удаления арматуры и дробления в щековой дробилке. Фракция щебня составляла 5-20 мм. Истинная плотность щебня составляла 2632 кг/м^3 , насыпная 1430 кг/м^3 .

Для снижения сил трения внутри цементной матрицы и получения оптимальной упаковки компонентов бетонной смеси, использовали водный раствор гиперпластификатора Sika ViscoCrete-5-600 SP с сухим остатком 33 г/100 мл. Дозировка составляла 0,75% от массы вяжущего.

Измельчённый в шаровой мельнице песок из лома бетона получает механическую активацию, а наличие в его составе цементного клинкера оказывает роль катализатора на гидратацию цемента, что приводит к

ускорению процессов твердения и набору прочности в ранние сроки экспозиции и уменьшению пористости цементного камня [7-9].

Измельченный до удельной поверхности 3000-3500 см²/г кварцевый песок также способствует формированию оптимальной структуры бетона [10-12].

Мелкодисперсные наполнители и полимерные добавки способствуют в совокупности управлением пластических свойств цементных тонкодисперсных систем и бетонов на их основе [13, 14]. Сочетание механической активации с химической позволяет достичь за счет синергетического эффекта требуемых свойств композиционных материалов. В табл. 2 представлены составы исследуемых бетонов.

Таблица № 2

Состав и физико-механические бетонов

№ п/п	Ингредиенты, свойства	Расход на 1 м ³ , кг			
		№ состава			
		1	2	3	4
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
1	СЕМ I 42,5N	236/76,1	236/76,1	236/76,1	236/76,1
2	Молотый песок, Сурский	206/77,7	-	206/77,7	
3	Молотый песок из лома бетона	-	206/78,2	-	206/78,2
	Песок фр. 0.32-0.16 мм	463/180,7	522/203,7	-	266/103
	Песок фр. 0.63-0.16 мм	385/150	344/134,4	-	400/156
	Песок фр. 2.5-0.32 мм	440/167	417/158,2	-	274/104
4	Песок Сурский, рядовой	-	-	441/166,4	-
	Песок фр. 0.32-0.16 мм	-	-	180/68,0	-

1	2	3	4	5	6
	Песок фр. 0.63-0.16 мм	-	-	234/88,3	-
	Песок фр. 2.5-0.32 мм	-	-	113/42,6	-
5	Щебень фр. 5-20 из лома бетона	500/190	500/190	850/323	850/323
6	Sika ViscoCrete-5-600 SP	7	7	7	7
7	Вода	150	152	149	152
8	Общий выход смеси, P/V(кг/л)	2387/998,5	2384/999,6	2417/999,1	2391/1000
9	В/Ц	0,66	0,67	0,63	0,67
10	В/Т	0,069	0,07	0,066	0,07
11	Осадка конуса (ОК), см	7-9	8-9	8	8-9
12	Прочность бетона (МПа) на сжатие в возрасте: 3 суток	33,42	36,14	28,01	25,55
	7 суток	43,20	45,90	39,25	37,12
	14 суток	48,16	51,03	41,40	40,36
	28 суток	54,35	57,87	46,72	44,93
13	Удельный расход цемента на единицу прочности ($\rho_{уд}$), кг/МПа	4,34	4,07	5,05	5,25
14	Водостойкость	0,96	0,97	0,94	0,91

Подготовленные ингредиенты засыпаются в скоростной бетоносмеситель миксерного типа с регулируемой скоростью вращения вала смесителя. Дозируют в первую очередь наполнитель и портландцемент при скорости вращения вала 300 об^{-1} . Время перемешивания смеси - 20 сек. Затем дозируются фракции песка с интервалом 10 сек. Через 60 сек. при частоте вращения вала смесителя 45 об^{-1} вводится в смеситель щебень из лома бетона. Время перемешивания - 2,5 мин. После усреднения состава и

равномерного распределения всех ингредиентов по объему добавляется вода совместно с Sika ViscoCrete-5-600 SP. Общее время приготовления бетонной смеси - 5 мин.

Обсуждение

Получены бетоны прочностью 44,9-57,9 МПа при расходе портландцемента 236 кг/м³, тогда как для получения данной прочности для бетонов старого поколения потребовалось 600-780 кг/м³ [5, 6]. Высокая прочность новых бетонов на основе лома бетона обеспечена оптимальной структурой цементной матрицы в результате наполнения тонкомолотым сурским песком (рядовым) и молотым ломом бетона до удельной поверхности, равной исходному портландцементу пластифицированных цементных суспензий.

Оптимальными составами являются составы № 1 и 2. Для дальнейших исследований выбираем состав № 2 (табл. 2). Второй этап исследований – это определение наиболее благоприятных условий твердения. В табл. 3 представлены результаты набора прочности бетонных образцов, помещенных в различные условия твердения.

Таблица № 3

Кинетика набора прочности бетонных образцов при твердении в различных условиях

Состав №1 (табл. 2), свойства	Возраст, сут.	Условия твердения бетонных образцов		
		При полном погружении в воду	В изоляционной оболочке из полиэтилена	В воздушных условиях при постоянном увлажнении
Прочность бетона на сжатие, (МПа)	3	28,4	22,8	25,6
	7	40,8	38,1	39,6
	28	59,2	51,4	56,7

При всех условиях твердения прочность бетона на сжатие увеличивается с возрастом. Самая высокая прочность на сжатие во всех возрастных группах была получена при полном погружении в емкость с водой. Средняя прочность на сжатие водоотверждаемого бетона составила 28,4 МПа, 40,8 МПа и 59,2 МПа через 3, 7 и 28 дней соответственно.

Метод твердения на воздухе при двухразовом в день увлажнении позволяет получить прочность на сжатие, близкую к прочности при полном погружении в воду. При данном способе твердения прочность бетона составляет 25,6 МПа, 39,6 МПа и 56,7 МПа через 3, 7 и 28 суток соответственно.

При твердении в изоляционной оболочке из полиэтилена прочность на сжатие самая низкая и составляет 22,8 МПа, 38,1 МПа и 51,4 МПа на 3, 7 и 28 сутки твердения соответственно.

Получение более высокой прочности на сжатие при полном погружении в воду и двухразовом орошении в день всей поверхности бетона объясняется достаточной влажностью и оптимальным общим температурно-влажностным режимом, а также давлением водяного пара, что обеспечивало благоприятные условия для продолжения гидратации цементного клинкера вяжущего.

Метод твердения в условиях изоляции в пластиковой оболочке дает самую низкую прочность на сжатие для всех возрастов. Это вызвано снижением влажности бетона в раннем возрасте, что способствовало замедлению процессов гидратации клинкера до того, как поры были заполнены адекватным количеством гидрата силиката кальция.

Выводы

1. Представлены практические результаты кинетики набора прочности бетонных образцов в зависимости от условий твердения.

2. Целесообразно использовать в производстве бетонных изделий заполнители и наполнители, полученные из лома бетонов после их классификации и при подготовке для вторичного применения.
 3. Твердение бетонных образцов при полном погружении в воду является наиболее эффективным методом твердения. Это позволило получить самую высокую прочность на сжатие, что связано с большей степенью реакции гидратации цементного клинкера на всех этапах твердения без потери влаги, это привело к снижению пористости и получению пор меньших размеров.
 4. При твердении на воздухе с двухразовым орошением водой поверхности бетонных образцов, прочность на сжатие на 10% выше, чем при твердении в изоляционной пленке. Это связано с уменьшением движения влаги по капиллярам из образцов бетона наружу, что приводит к повышенной степени гидратации цемента.
 5. Метод твердения бетонных образцов в изоляционной пленке обеспечивает самый низкий уровень набора прочности на сжатие по рассматриваемым в исследовании способам. Это связано с тем, что миграция влаги из образца бетона наружу выше, чем в других рассмотренных методах твердения. В результате нехватки влаги для протекания реакции гидратации цемента, происходит преждевременное обезвоживание бетона и все процессы твердения замедляются.
 6. Для достижения максимальной прочности бетоны образцы должны твердеть в водных условиях при полном погружении. Такая методика твердения не приводит к потере влаги и, следовательно, обеспечивает благоприятные условия для протекания реакции гидратации цементного клинкера.
 7. В производственных условиях для обеспечения благоприятных условий набора прочности строительных конструкций из монолитного
-

бетона рекомендуется использовать метод двухразового орошения поверхности водой.

Литература

1. Nasir M. Influence of casting temperature and curing mode on the mechanical properties and durability of concrete //King Fahd University of Petroleum and Minerals, Al-Ahsa, Saudi Arabia, Dissertation, 2013, 271 p.
2. Zeyad A. M. Effect of hot weather curing methods on the properties of high-strength concretes // Journal of King Saud University–Engineering Sciences, 2017, vol. 31, no 3, pp. 1-7.
3. Mohamed H. A. Effect of fly ash and silica on the compressive strength of self-compacting concrete under various curing conditions //Ain Shams Engineering Journal, 2011, vol. 2, № 2, pp. 79-86.
4. Kim J. K., Han S. H., Song Y. C. Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete: Part I // Cement and Concrete Research, 2002, vol. 32, no. 7, pp. 1087-1094.
5. Романенко И.И., Петровнина И.Н., Романенко М.И. Модифицирование вяжущего тонкомолотыми компонентами // Дневник науки, 2018, № 2 URL: dnevniknauki.ru/index.php/number2-2018/tekhnicheskie-nauki-2-2018.
6. Калашников В.И. Что такое порошково - активированный бетон нового поколения // Строительные материалы, 2012, № 6, С.1-2.
7. Курочка П.Н., Гаврилов А.В. Бетоны на комплексном вяжущем и мелком песке // Инженерный вестник Дона, 2013, № 1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/nly2013/1562.
8. Осадченко А.М., Терехина Ю.В., Новикова А.С. Об эффективности комплексного теплого бетонирования и водного горячего твердения бетона // Инженерный вестник Дона, 2013, №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2100.

9. Aldea C.M., Young F., Wang K., Shah S. P. Влияние условий отверждения на свойства бетона с использованием замены шлака // *Cement and Concrete Research*, 2000, vol. 30, no. 3, pp. 465-472.
10. Rakhal K.N., Effect of improper wet curing on the bending strength of boards cast in hot weather conditions // *Building and Construction Materials*, 2016, vol. 110, pp. 337-345,
11. Романенко И.И., Петровнина И.Н. Влияние модификаторов структуры шлакощелочного вяжущего на трещинообразование // *Инженерный вестник Дона*, 2021, №7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2021/7076.
12. Zheng, G., et al. (2015) Alkali-Activation Reactivity of Chemosynthetic $Al_2O_3-2SiO_2$ Powders and Their ^{27}Al and ^{29}Si Magic-Angle Spinning Nuclear Magnetic Resonance Spectra. *Particuology*, 22, pp. 151-156 URL: doi.org/10.1016/j.partic.2014.10.006.
13. Atiş, C.D., et al. Influence of Activator on the Strength and Drying Shrinkage of Alkali-Activated Slag Mortar // *Construction and Building Materials*, 2013, vol. 23, pp. 548-555.
14. Gallucci E., Zhang X., Scrivener K. L. Effect of temperature on the microstructure of calcium silicate hydrate (C-S-H) // *Cement and Concrete Research*, 2013, vol. 53, pp. 185-195.

References

1. Nasir M. King Fahd University of Petroleum and Minerals, Al-Ahsa, Saudi Arabia, Dissertation, 2013, 271 p.
 2. Zeyad A. M. *Journal of King Saud University. Engineering Sciences*, 2017, vol. 31, № 3, pp. 1-7.
 3. Mohamed H. A. *Ain Shams Engineering Journal*, 2011, vol. 2, № 2, pp. 79-86.
 4. Kim J. K., Han S. H., Song Y. C. Part I. *Cement and Concrete Research*, 2002, vol. 32, № 7, pp. 1087-1094.
-



5. Romanenko I.I., Petrovnina I.N., Romanenko M.I. Dnevnik nauki, 2018, № 2.
URL: dnevniknauki.ru/index.php/number2-2018/tekhnicheskie-nauki-2-2018.
6. Kalashnikov V.I. Stroitel'nye materialy, 2012, № 6, pp. 1-2.
7. Kurochka P.N., Gavrilov A.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, № 1. URL:
ivdon.ru/magazine/archive/nly2013/1562.
8. Osadchenko A.M., Terekhina YU.V, Novikova A.S. Inzhenernyj vestnik Dona,
2013, № 4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2100.
9. Aldea C.M., Young F., Wang K., Shah S. P. Cement and Concrete Research,
2000, vol. 30, no. 3, pp. 465-472.
10. Rakhal K. N., Building and Construction Materials, 2016, vol. 110, pp. 337-
345,
11. Romanenko I.I., Petrovnina I.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, № 7.
URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2021/7076.
12. Zheng, G., et al. (2015). Particuology, 22, pp. 151-156 URL:
doi.org/10.1016/j.partic.2014.10.006.
13. Atiş, C.D., et al. (2009). Construction and Building Materials, 2013, vol. 23,
pp. 548-555.
14. Gallucci E., Zhang X., Scrivener K. L. Cement and Concrete Research,
2013, vol. 53, pp. 185-195.