

Усадка геополимерного вяжущего на различных этапах его структурообразования

Н.А. Ерошкина, М.О. Коровкин

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Аннотация: Исследовано влияние удельной поверхности добавки шлака и силикатного модуля активатора твердения геополимерного вяжущего на основе измельченного отсева гранита на усадочные деформации растворной составляющей бетона. Установлено, что наиболее интенсивно усадка развивается на ранних стадиях структурообразования геополимерного вяжущего. Особое значение для структурообразования геополимерного бетона имеет усадка на этапе схватывания и набора начальной прочности, что необходимо учитывать при назначении режимов тепловлажностной обработки при заводском производстве изделий и конструкций на основе геополимерного бетона.

Ключевые слова: геополимер, твердение, усадка, структурообразование, шлак, активатор твердения, отход дробления гранитного щебня.

Введение

Разработка геополимерного вяжущего на основе измельченных горных пород относится к числу наиболее перспективных малоэнергоёмких и ресурсосберегающих технологий строительных материалов [1, 2]. Однако широкое внедрение в практику этих материалов сдерживается недостаточно изученной долговечностью геополимеров. К числу факторов, определяющих долговечность бетонов, относится усадка, от которой во многом зависит их трещиностойкость и проницаемость для коррозионно-активных агентов [3-5].

Несмотря на большое значение усадки геополимерных и других активизированных щелочами вяжущих, это явление изучено недостаточно и иногда имеет непредсказуемый характер, что сдерживает применение этих вяжущих в промышленных масштабах [6, 7]. В связи с этим выявление закономерностей усадки геополимерных вяжущих на различных этапах их структурообразования позволит точнее прогнозировать долговременные свойства геополимерных бетонов.

Методы и материалы для исследований

Для приготовления геополимерного вяжущего использовался отсев дробления гранитного щебня Павловского месторождения с добавкой 24 % доменного гранулированного шлака производства Новолипецкого металлургического комбината. Гранит измельчался до удельной поверхности $350 \text{ м}^2/\text{кг}$, а шлак – 166, 258, $350 \text{ м}^2/\text{кг}$. Для активации твердения вяжущего использовалось жидкое стекло, которое, как показывает опыт различных исследователей, позволяет получить вяжущие с высокими характеристиками [2, 8, 9]. В жидкое стекло вводился NaOH для снижения силикатного модуля M_c до значений 1,2...1,6. Расход активатора составлял 12 % в пересчете на сухое вещество. Исследования проводились на растворной составляющей бетона состава 1:1. Для приготовления растворных смесей использовался песок Сурского месторождения.

Усадка измерялась на образцах $100 \times 20 \times 20$ мм с помощью компаратора ИЗА-2, что позволяло начать определять деформации образцов уже через несколько минут после их формования.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

На основе анализа кинетики твердения и усадки геополимерных вяжущих на базе измельченных горных пород с добавкой шлака [4, 5] усадочные деформации этих материалов можно разделить на несколько этапов:

- 1-й этап: ранние пластические деформации в интервале 5...15 мин;
- 2-й этап: пластические деформации в интервале от 15 мин до 3 часов;
- 3-й этап: усадка при схватывании и наборе начальной прочности – от 3 часов до 1 суток;
- 4-й этап: усадка при интенсивном наборе прочности – от 1 до 14 суток;

- 5-й этап: усадка при замедлении и стабилизации структурообразования – от 14 до 28 суток;

- 6-й этап: усадка при стабилизации прочностных характеристик – от 28 суток до 1 года.

Значения усадки для каждого из этих этапов в зависимости от удельной поверхности шлака и силикатного модуля активатора приведены в таблице.

Таблица

Влияние удельной поверхности шлака и силикатного модуля активатора твердения на усадку на различных этапах структурообразования

$S_{уд}$ шлака, $м^2/кг$	M_c	Значения усадки, мм/м					
		1-й этап	2-й этап	3-й этап	4-й этап	5-й этап	6-й этап
166	1,2	2,369	0,087	0,140	0,317	0,037	0,045
	1,4	2,206	0,043	0,174	0,211	0,060	0,082
	1,6	1,449	0,069	0,179	0,239	0,055	0,071
258	1,2	2,890	0,061	0,116	0,340	0,043	0,092
	1,4	2,601	0,084	0,165	0,270	0,046	0,063
	1,6	2,384	0,078	0,100	0,344	0,052	0,079
350	1,2	1,648	0,058	0,150	0,334	0,060	0,078
	1,4	1,217	0,091	0,141	0,378	0,056	0,071
	1,6	0,161	0,075	0,106	0,349	0,033	0,063

Анализ значений приращения усадки на различных этапах структурообразования показывает, что наиболее интенсивный рост усадочных деформаций наблюдается на первом этапе (пластическая усадка, вызванная взаимодействием шлака и щелочного активатора). Этот вид усадки возрастает при снижении силикатного модуля, что обусловлено ускорением процесса взаимодействия шлака и активатора при увеличении содержания щелочи в последнем. Повышение удельной поверхности шлака от 166 до 258 $м^2/кг$ также приводит к увеличению усадки на этом этапе структурообразования геополимерного вяжущего. Однако дальнейшее повышение дисперсности шлака дает снижение усадки, что может быть

вызвано тем, что в результате интенсификации взаимодействия активатора с более дисперсным шлаком значительная доля этого вида усадки протекает в процессе приготовления смеси в течение 5 мин, до формования образца и начала измерения усадки.

Несмотря на высокие значения усадки, которая развивается за непродолжительное время, эти деформации не приводят к деструктивным процессам, так как материал находится в пластичном состоянии и способен деформироваться без образования трещин и разрывов.

На втором этапе, до наступления процесса схватывания, пластичность материала снижается, однако усадка в этот период значительно ниже, что обеспечивает отсутствие образования трещин в геополимерном растворе на этом этапе твердения.

Более опасна с точки зрения образования трещин усадка вяжущего камня после его схватывания при начальном твердении (3-й этап), когда прочность еще невысока, а материал в значительной степени утратил способность к пластическим деформациям. Усадка на этом этапе возрастает, что может вызвать развитие деструктивных процессов в материале, особенно при дополнительных деформациях материала в случае его тепловлажностной обработки в условиях заводского производства. В связи с тем, что уровень снижения прочности в таких условиях трудно прогнозировать, на практике продолжительность предварительной выдержки бетона и режим его прогрева уточняют экспериментально.

Значительно возрастает усадка при интенсивном наборе прочности, продолжительность которого составляет около 2 недель, в течение этого периода геополимерное вяжущее набирает от 90 до 95 % прочности от прочности в возрасте 28 суток. Это связано с уплотнением структуры материала на микроуровне, «залечиванием» ее дефектов.

Отмечается тенденция к увеличению усадки при повышении удельной поверхности добавки шлака. Кроме того, можно отметить, что с точки зрения снижения усадки оптимальное значение M_c активатора твердения для всех исследованных удельных поверхностей шлака, кроме самой высокой, составляет 1,4. При использовании шлака с высокой дисперсностью силикатный модуль мало влияет на усадку.

Усадочные деформации на пятом и шестом этапах структурообразования геополимерного вяжущего снижаются в несколько раз в сравнении с усадкой на этапе интенсивного набора прочности. Усадка на последних этапах связана с частичным высушиванием материала.

Усадочные деформации на этапе схватывания и набора начальной прочности оказывают большое влияние на структурообразование геополимерного бетона на основе измельченных отходов добычи и переработки магматических горных пород, особенно при его тепловлажностной обработке. Повышенным микротрещинообразованием при тепловлажностной обработке бетона можно объяснить снижение модуля упругости пропаренных геополимерных бетонов [10] в сравнении с бетонами нормального твердения.

Литература

1. Davidovits J. Geopolymer Chemistry and Applications, 4th edition. Saint-Quentin, France, 2015. 644 p.
2. Ерошкина Н.А., Коровкин М.О., Аксенов С.В. Малоэнергоемкие ресурсосберегающие технологии производства вяжущих для конструкционных бетонов // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. С. 45.
3. Ерошкина Н.А. Роль усадки в структурообразовании геополимерного бетона // Образование и наука в современном мире. Инновации. 2016. № 5. С.198-206.



4. Sakulich A.R., Bentz D.P. Mitigation of autogenous shrinkage in alkali activated slag mortars by internal curing // *Materials and Structures*. 2013. Vol. 46. pp. 1355-1367.

5. Kiran K Shetty, Gopinatha Nayak, Poornachandra Pandit et al. Strength and Shrinkage Characteristics of Geo-Polymer Concrete // *International Journal of Earth Sciences and Engineering*. 2015. Vol. 08, No. 2. pp. 169-172.

6. Deb P., Nath P., Sarker P. Drying shrinkage of slag blended fly ash geopolymer concrete cured at room temperature // *Procedia Engineering* 125: The 5th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum. 2015. pp. 594-600.

7. Castel A., Foster S. J., Ng T. et al. Creep and drying shrinkage of a blended slag and low calcium fly ash geopolymer Concrete // *Materials and Structures*. 2016. Vol. 49, Issue 5. pp. 1619-1628.

8. Фиговский О.Л., Кудрявцев П.Г. Жидкое стекло и водные растворы силикатов, как перспективная основа технологических процессов получения новых нанокomпозиционных материалов // *Инженерный вестник Дона*, 2014, №2 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2448/.

9. Шляхова Е.А., Акопян А.Ф., Акопян В.Ф. Применение метода рентгенофазового анализа для изучения свойств модифицированного шлакощелочного вяжущего // *Инженерный вестник Дона*, 2012, №4, Ч.2 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1395/.

10. Ерошкина Н.А., Коровкин М.О. Исследование деформационно-прочностных свойств бетона на основе минерально-щелочного вяжущего // *Вестник МГСУ*. 2011. № 2-2. С. 314-319.

References

1. Davidovits J. *Geopolymer Chemistry and Applications*. 4th edition. Saint-Quentin, France, 2015. 644 p.



2. Eroshkina N.A., Korovkin M.O., Aksenov S.V. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*. 2013. № 6. p. 45.
3. Eroshkina N.A. *Obrazovanie i nauka v sovremennom mire. Innovatsii*. 2016. № 5. pp. 198-206.
4. Sakulich A.R., Bentz D.P. *Materials and Structures*. 2013. Vol. 46. pp. 1355-1367.
5. Kiran K Shetty, Gopinatha Nayak, Poornachandra Pandit et al. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*. 2015. Vol. 08, No. 2. pp. 169-172.
6. Deb P., Nath P., Sarker P. *Procedia Engineering 125: The 5th Inter. Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum*. 2015. pp. 594-600.
7. Castel A., Foster S. J., Ng T. et al. *Materials and Structures*. 2016. Vol. 49, Issue 5. pp. 1619-1628.
8. Figovskiy O.L., Kudryavtsev P.G. *Inzhenernyj vestnik Dona (Rus)*, 2014, №2 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2448/.
9. Shlyakhova E.A., Akopyan A.F., Akopyan V.F. *Inzhenernyj vestnik Dona (Rus)*, 2012, №4, Ch.2 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1395/.
10. Eroshkina N.A., Korovkin M.O. *Vestnik MGSU*. 2011. № 2-2. pp. 314-319.