

УДК 691.3:663.94

И. Н. Максимова, Т. К. Акчурин, Н. И. Макридин, О. В. Тараканов, Е. А. Тамбовцева

К ВОПРОСУ О КОРРЕЛЯЦИИ УСАДКИ И ПРОЧНОСТИ БЕТОНОВ

Приведен анализ научных представлений о формировании структуры и прочности легких конструкционных бетонов с учетом процесса влагообмена между пористыми системами цементного камня и пористого заполнителя и влажностных деформаций между этими структурными элементами, оказывающими взаимовлияние на формирование структуры и прочности легкого бетона.

К л ю ч е в ы е с л о в а: цементный камень, пористый заполнитель, влажностные деформации, структурообразование, прочность бетона.

The authors carry out the analysis of scientific knowledge about the formation of the structure and strength of lightweight constructional concrete with account of moisture exchange process between porous cement systems and foam filler and humidity strains between these structural elements, providing mutual influence on the shaping of the structure and strength of lightweight concrete.

K e y w o r d s: cement stone, porous filling, humidity strains, structure formation, strength of concrete.

Рассматривая формирование структуры и прочности легкого бетона с учетом эффекта предварительного обжаривания пористого заполнителя, обусловленного самопроизвольными влажностными деформациями усадки цементного камня, следует отметить, что усадка свойственна большинству строительных материалов, изготовленных на основе портландцементов.

Первые данные по усадке бетонов были опубликованы еще в 1899 г. Консидером. С тех пор влажностная усадка бетона изучалась многими исследователями как в нашей стране, так и за рубежом. Однако природа влажностной усадки бетона оказалась настолько сложной, что до настоящего времени нет еще общепризнанной интерпретации ее физической сущности, поэтому она интенсивно изучается и в настоящее время.

В нашу задачу входило проиллюстрировать мнение исследователей о влиянии усадки на формирование физико-механических свойств бетона.

Работами многих ученых было показано, что в процессе затворения цемента с водой, его схватывания и твердения цементное тесто уменьшается в объеме. Это беспрепятственное уменьшение объема продолжается до возникновения определенной структуры цементного камня, характеризующей моментом начала схватывания цемента.

В дальнейшем свободному уменьшению объема будет препятствовать сформировавшаяся структура и непрогидратированные зерна цемента, в результате чего в цементном камне возникают внутренние напряжения, которые обычно называют структурными.

При высушивании цементного камня в нем возникает новая система напряжений, обусловленная неравномерным удалением влаги из образца и неоднородной усадкой.

Переходя к рассмотрению механизма усадки бетона, следует отметить, что дополнительным очагом возникновения структурных напряжений в последнем являются частицы крупного заполнителя. Влияние реологических

свойств заполнителя на эти напряжения велико, как это показано в ряде исследований [1, 2].

Исходя из представлений об усадке, бетон обычно изучают как двухфазную систему, полагая, что заполнители в процессе формирования структуры бетона не меняют своих свойств и не подвержены усадке. На основании опытов легкий бетон, в частности аглопоритобетон и керамзитобетон, с точки зрения усадки, по-видимому, можно рассматривать как биактивную систему, так как с физической точки зрения данные заполнители активно влияют на характер усадки бетона и формирование его структуры и прочности.

Такой подход к легкому бетону, в отличие от обычного на плотных заполнителях, обусловлен тем, что пористые заполнители не оказывают существенного торможения влажностной усадке цементного камня за счет эффекта обжатия. Известно, что на деформативную способность бетона при кратковременном и длительном нагружении существенное влияние оказывают заполнители.

Г. Д. Цискрели [3] полагает, что модуль упругости обычного бетона на плотных заполнителях есть функция прочности и объемного веса бетона. При равной прочности бетоны на пористых заполнителях имеют вдвое меньший модуль упругости, вдвое большую предельную сжимаемость и растяжимость, а также поперечную деформацию при сжатии по сравнению с тяжелыми бетонами, как это показано М. З. Симоновым [4].

Объяснение различной деформативной способности тяжелых и легких бетонов различной природой структуры заполнителей, по-видимому, будет однозначным. Вероятно, для объяснения этого положения необходимо учитывать, при всех прочих равных условиях, структуру цементного камня, формирование которой, с точки зрения структурных напряжений, будет существенно отличаться в бетонах на плотных и пористых заполнителях.

Анализируя опытные данные о влиянии усадки цементного камня на формирование структуры бетона и его прочности, необходимо отметить некоторую противоречивость во взглядах ряда специалистов по этому вопросу.

Бесспорным признается всеми исследователями возникновение структурных напряжений в бетоне, обусловленных собственно усадкой, которые приводят к разрыхлению структуры бетона и понижению его прочности. Подтверждением этого положения служат опыты А. В. Саталкина [5], в которых он показал, что при раннем нагружении бетона наблюдается модифицирование структуры цементного камня, выражающееся в измельчении структурных элементов последнего, повышении его однородности и уменьшении внутреннего напряженного состояния; а также опыты последних лет [6] по эффекту повторного вибрирования бетонов, который заключается в снятии начальных напряжений в структуре цементного камня, возникающих в нем в процессе схватывания и твердения.

Как было указано выше, влажностная усадка способствует возникновению новой системы напряжений. Отсутствие гигрометрического равновесия с окружающей средой приводит к высыханию капиллярно-пористого бетона. Высыхание бетона по объему происходит неравномерно вследствие малости коэффициента диффузии влаги, в результате чего в нем возникают градиенты влажности и усадочные напряжения. Это приводит к возникновению на поверхности бетонного образца растягивающих напряжений, а внутри — сжимающих.

Отрицательное влияние влажностной усадки на структуру бетона проявляется в нем в виде появления усадочных трещин.

Однако необходимо отметить и противоположную точку зрения ряда исследователей. В одной из работ Я. В. Столяров [7] отмечал: «Огульное признание усадки бетона вредным явлением, весьма распространенное в технических кругах, следует считать неправильным. В зависимости от характера работы конструкции усадка может оказаться или выгодной, или невыгодной».

Е. Фрейсинэ [8] пишет: «Можно считать установленным, что прочность цементов растет с возрастом бетона очень долго. Из сказанного выше следует, что значительная часть увеличения прочности, в настоящий момент не известная, является следствием увеличения со временем усадочного сжатия».

К. Вальц [9] полагает, что градиентные напряжения, обусловленные неоднородной усадкой, оказывают большое влияние на работу материала: они увеличивают прочность на растяжение.

Анализируя литературные данные по явлению «усадка-обжатие» в бетоне, следует подчеркнуть, что факт существования обжатия заполнителя в бетоне окружающей его оболочкой цементного камня при усадке последней признается многими исследователями. Так, С. Е. Фрайфельд [10] отмечает, что «прочность бетона на малопрочном заполнителе значительно увеличивается при увеличении прочности последнего, так как увеличивается не только непосредственная его прочность, но и обжатие усадкой».

Ю. Е. Корнилович [11] считает, что зерно заполнителя, окруженное оболочкой вяжущего, в случае свободного расширения последнего при твердении приводит к ослаблению контакта между вяжущим и заполнителем и нарушению адгезии, а в случае усадки — наоборот, к усилению контакта и адгезии.

Я. В. Столяров [7] указывает, что из двух факторов, определяющих сцепление арматуры с бетоном, второй представляет «трение стержня в бетоне, возникающее при малейших деформациях стержня под нагрузкой, это трение получается в результате давления, которое оказывает бетон на стержень вследствие происходящей в нем усадки».

Р. Лермит [12] отмечает, что цементный камень, испытывая усадку, подвергается реактивному воздействию со стороны заполнителя.

В. Хенк [13] показал расчетным путем величину радиальных сжимающих и касательных растягивающих напряжений в оболочке цементного камня, окружающей заполнитель, когда она стремится сжаться.

Опыты по определению трещиностойкости бетонов на кольцевых образцах также базируются на эффекте обжатия стального сердечника окружающим цементным кольцом. На этом же принципе основан и метод, предложенный Р. Л. Маилянм. И, наконец, об этом говорит сама усадка бетонов на различных заполнителях. Многочисленными опытами показано, что при прочих равных условиях усадка бетона тем больше, чем меньше модуль упругости заполнителей.

Таким образом, обжатие заполнителей в бетоне на основании приведенного анализа можно считать реальным. О том, что это обжатие приводит к возникновению системы внутренних напряжений в бетоне, которые складываются с напряжениями от внешних сил, также нет противоречивых мнений у исследователей. По этому поводу А. Е. Десов [2] отмечает, что расхождение

между теорией и опытом объясняется неучетом влияния внутренних напряжений на деформации и прочность бетона.

Влияние обжатия заполнителей в бетоне на его структурообразование и прочность велико, как это видно из сделанного выше обзора. Однако влияние обжатия заполнителей в тяжелых и легких бетонах имеет качественное различие. Если в бетонах на плотных заполнителях с высоким модулем упругости, по сравнению с цементным камнем, обжатие приводит к значительным структурным напряжениям и «разрыхлению» структуры цементного камня, что сказывается на понижении прочности бетона и ухудшении адгезии цементного камня с заполнителем (в наших опытах балочка $4 \times 4 \times 16$ см, изготовленная на металлическом заполнителе, шариках диаметром 8...10 мм и цементном тесте ($V/C = 0,5$) в возрасте 570 дней при хранении на воздухе в лаборатории самопроизвольно разрушилась), то в бетонах на пористых заполнителях, которые имеют невысокий модуль упругости, проявляется эффект обжатия заполнителя за счет его податливости от усилий, развиваемых сжимающейся оболочкой цементного камня. Влияние этого эффекта на формирование структуры и прочности легкого конструктивного бетона велико. Прежде всего, обжатие приводит к сжатию заполнителя, что увеличивает его растяжимость под нагрузкой при работе конструкции. Во-вторых, за счет податливости заполнителя в окружающем цементном камне развиваются значительно меньшие структурные напряжения и, естественно, проявляется в меньшей мере «разрыхление» его структуры, что будет способствовать увеличению прочности бетона на сжатие и, особенно, на растяжение. В-третьих, обжатие создает лучшие условия срастания заполнителя и цементного раствора при нарушении монолитности последнего. Это происходит за счет возможных упругих деформаций расширения заполнителя при накоплении микротрещин и появлении разрывов в растворной части бетона.

Подтверждением этого положения могут служить общепризнанные данные о повышенной сжимаемости и растяжимости легких бетонов, о превышении предельной деформации расширения опочного щебня, испытанного в бетоне, на одну треть по сравнению с отдельно испытанной опокой, а также данные В. И. Осидзе [14], в которых он показал, что растяжимость бетона на известняковом щебне на 70...90 % выше, чем на щебне из песчаника.

По-видимому, необходимо отметить и то обстоятельство, что в зависимости от оптимального соотношения деформаций обжатия заполнителя и возникающих при этом структурных напряжений в цементном камне это явление будет сказываться или положительно, или отрицательно на структурообразовании и прочности бетона.

Логично предположить, что повышение прочности легкого бетона путем дальнейшего повышения прочности пористого заполнителя будет ограничиваться интенсивным ростом структурных напряжений и сопутствующими явлениями, о которых было сказано выше. Такова суть и диалектическая противоречивость указанных явлений.

И в заключение укажем, что на эффект обжатия искусственных пористых заполнителей значительное влияние оказывают деформативные особенности последних при увлажнении и высушивании [15].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ахвердов И. Н.* О научных проблемах в области легких бетонов // *Аглопорит и аглопоритобетон*. Минск, 1964. С. 12—20.
2. *Десов А. Е.* Некоторые вопросы структуры, прочности и деформаций бетонов // *Структура, прочность и деформации бетонов*. М. : Стройиздат, 1966. С. 4—58.
3. *Цискрели Г. Д.* Сопротивление растяжению неармированных и армированных бетонов. М. : Госстройиздат, 1954. 174 с.
4. *Симонов М. З.* Основы технологии легких бетонов. М. : Стройиздат, 1973. 584 с.
5. *Саталкин А. В., Сенченко Б. А.* Раннее нагружение бетона и железобетона в мостостроении. М. : Автотрансиздат, 1956. 216 с.
6. *Куннос Г. Я.* Вибрационная технология бетона. Л. : Стройиздат, 1967. 136 с.
7. *Столяр Я. В.* Введение в теорию железобетона. М. : Госстройиздат, 1941. 276 с.
8. *Фрейсинэ Е.* Переворот в технике бетона // *ОНТИ*. 1938. 141 с.
9. *Вальц К.* Усадочные деформации и напряжения бетона ; пер. с нем. // II Международный конгресс по бетону в Висбадене. М. : Госстройиздат, 1960. С. 55—60.
10. *Фрайфельд С. Е.* Физико-механические свойства бетона и керамзитобетона на керамзитовом гравии // *ЦНИИСМ. Труды института*. Вып. IV. Государственное издательство строительной литературы, 1941. С. 23—32.
11. *Корнилович Ю. Е.* Связующие свойства цементов. М. : Академия наук УССР, 1952. 150 с.
12. *Лермит Р.* Проблемы технологии бетона. М. : Госстройиздат, 1959. 247 с.
13. *Henk B.* Betrachtung uber Yefligespach — nunges im Beton, Zement-Kalk-Yips. Bd. 9, № 3. 1956.
14. *Осидзе В. И.* Прочность и деформативность бетона на известковом заполнителе // Всесоюзное совещание по современным проблемам технологии бетона в промышленности сборного железобетона. М. : Стройиздат, 1965. С. 141—147.
15. *Максимова И. Н., Макридин Н. И.* Строительное материаловедение конструкционных легких бетонов: монография. Пенза : ПГУАС, 2014. 204 с.

1. *Akhverdov I. N.* O nauchnykh problemakh v oblasti legkikh betonov // *Agloporit i agloporitobeton*. Minsk, 1964. S. 12—20.
2. *Desov A. E.* Nekotorye voprosy struktury, prochnosti i deformatsii betonov // *Struktura, prochnost' i deformatsii betonov*. M. : Stroiizdat, 1966. S. 4—58.
3. *Tsiskreli G. D.* Soprotivlenie rastyazheniyu nearmirovannykh i armirovannykh betonov. M. : Gosstroizdat, 1954. 174 s.
4. *Simonov M. Z.* Osnovy tekhnologii legkikh betonov. M. : Stroiizdat, 1973. 584 s.
5. *Satalkin A. V., Senchenko B. A.* Rannee nagruzhenie betona i zhelezobetona v mostostroenii. M. : Avtotransizdat, 1956. 216 s.
6. *Kunnos G. Ya.* Vibratsionnaya tekhnologiya betona. L. : Stroiizdat, 1967. 136 s.
7. *Stolyarov Ya. V.* Vvedenie v teoriyu zhelezobetona. M. : Gosstroizdat, 1941. 276 s.
8. *Freisine E.* Perevorot v tekhnike betona // *ONTI*. 1938. 141 s.
9. *Val'ts K.* Usadochnye deformatsii i napryazheniya betona ; per. s nem. // II Mezhdunarodnyi kongress po betonu v Visbadene. M. : Gosstroizdat, 1960. S. 55—60.
10. *Fraifel'd S. E.* Fiziko-mekhanicheskie svoistva betona i keramzitobetona na keramzitovom gravii // *TsNIISM. Trudy instituta*. Vyp. IV. Gosudarstvennoe izdatel'stvo stroitel'noi literatury, 1941. S. 23—32.
11. *Kornilovich Yu. E.* Svyazuyushchie svoistva tsementov. M. : Akademiya nauk USSR, 1952. 150 s.
12. *Lermit R.* Problemy tekhnologii betona. M. : Gosstroizdat, 1959. 247 s.
13. *Henk B.* Betrachtung uber Yefligespach — nunges im Beton, Zement-Kalk-Yips. Bd. 9, № 3. 1956.
14. *Osidze V. I.* Prochnost' i deformativnost' betona na izvestkovom zapolnitele // *Vsesoyuznoe soveshchanie po sovremennym problemam tekhnologii betona v promyshlennosti sbornogo zhelezobetona*. M. : Stroiizdat, 1965. S. 141—147.
15. *Maksimova I. N., Makridin N. I.* Stroitel'noe materialovedenie konstruktсионnykh legkikh betonov: monografiya. Penza : PGUAS, 2014. 204 s.

*Поступила в редакцию
в сентябре 2015 г.*

Ссылка для цитирования:

К вопросу о корреляции усадки и прочности бетонов / И. Н. Максимова, Т. К. Акчурин, Н. И. Макридин, О. В. Тараканов, Е. А. Тамбовцева // Интернет-вестник ВолгГАСУ. 2015. Вып. 3(39). Ст. 6. Режим доступа: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>

For citation:

Maksimova I. N., Akchurin T. K., Makridin N. I., Tarakanov O. V., Tambovtseva E. A. [To the question about shrinkage correlation and strength of concrete]. *Internet-Vestnik VolgGASU*, 2015, no. 3(39), paper 6. (In Russ.). Available at: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>