

УДК 691.328.32

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕСНЕННОЙ УСАДКИ КЕРАМЗИТОЖЕЛЕЗОБЕТОНА

*д-р техн. наук, проф. С.Д. СЕМЕНЮК,
канд. техн. наук, доц. Ю.Г. МОСКАЛЬКОВА, В.А. РЖЕВУЦКАЯ
(Белорусско-Российский университет, Могилев)*

В статье выполнен аналитический обзор отечественных и зарубежных исследований особенностей развития свободной и стесненной усадки для бетонов на плотных и пористых заполнителях. Рассмотрены две разные теории, удовлетворительно описывающие процесс усадки и не исключают друг друга. Освещены вопросы, связанные с влиянием компонентов заполнителей, цемента, водоцементного отношения и добавок на усадку керамзитобетона. Рассмотрены предложения по учету деформаций усадки в керамзитобетоне и керамзитожелезобетоне. Для более точного определения процесса накопления объемных усадочных деформаций и усовершенствования математической модели расчета относительных деформаций усадки в керамзитожелезобетоне разработана методика проведения испытаний на опытных образцах в виде призм, армированных продольной ненапрягаемой арматурой, с измерением деформаций усадки индикаторами часового типа.

Ключевые слова: усадка, стесненная усадка, керамзитобетон, керамзитожелезобетон, объемные деформации.

Введение. Усадка легких бетонов на 15–25% больше усадки равнопрочных тяжелых бетонов. В первые периоды твердения легких бетонов (3–40 часов) наблюдается увеличение объема, вызванное тепловым расширением заземленного воздуха под влиянием экзотермической теплоты, затем наблюдается уменьшение, т.е. объемная усадка. Принято различать усадку контракционную, карбонизационную и влажностную.

Наращение усадки, как и наращение прочности бетона, происходит примерно пропорционально логарифму времени. При этом усадка распространяется от поверхности вглубь бетона, а не протекает равномерно по объему: у поверхности усадка максимальна. Усадка наиболее интенсивно проявляется в начальный период твердения бетона и в течение первого года. По мере высыхания бетона уменьшается влажностный градиент, растущие кристаллические сростки создают в дальнейшем большее сопротивление внутреннему давлению и деформации усадки постепенно исчезают.

Статистическая обработка экспериментальных данных позволила представить значения относительных деформаций усадки в зависимости от основных влияющих факторов – расхода воды и цемента. Общеизвестно, что чем больше в бетоне цемента, тем больше усадка. Однако на величину усадки оказывает влияние не только количество цемента, но и объем цементного теста, т.е. водоцементное отношение (В/Ц), с увеличением которого усадка увеличивается и наоборот. Опытные данные, полученные с разного рода цементами, показывают наибольшую величину усадки около 3 мм на 1 пог. м для чистого цемента (цементного камня) в возрасте 5 лет, а для цементно-песчаной смеси в пропорции 1:3 – примерно от 1/3 до 1/2 усадки чистого цемента. Для бетонов величина годичной усадки выражается величиной примерно 0,2–0,4 мм на 1 пог. м.

Различные гидравлические добавки увеличивают усадку. В частности, увеличивает усадку и добавка ускорителя твердения (хлористого кальция).

Само явление усадки бетона не имеет еще в полной мере обоснованного объяснения ввиду сложного процесса твердения цемента и множества сопутствующих факторов.

Наиболее удовлетворительное объяснение усадки дают две теории, сущность которых заключается в следующем.

По первой теории [1] явление усадки ставится в зависимость от физико-химических процессов, сопровождающихся схватыванием цементного теста и твердением цементного камня. При этом одной из главных причин служит то, что цементное тесто, представляющее собой вначале студнеобразную массу (гель), в результате испарения избыточной воды, а отчасти и поглощением воды зернами цемента, вступающими в реакцию, постепенно обезвоживается и уплотняется. К этому присоединяется еще и влияние процесса кристаллообразования: кристаллы пронизывают массу геля и, срастаясь между собой, создают твердый скелет (сросток) цементного камня. Совместное влияние этих процессов и вызывает в цементном камне объемные изменения, называемое усадкой. Интенсивность усадки в начале процесса зависит от скорости гидратации цемента и количества воды, взятой для затворения цементного теста, в дальнейшем с уменьшением количества воды усадка протекает значительно медленнее.

Вторая теория [2] основана на свойствах капиллярности: поверхностное натяжение менисков, образующихся в смоченных водой порах, приводит к стягиванию стенок пор, что в результате и вызывает сжатие цементного камня. Так как микропоры распределены по всей массе бетона более или менее

равномерно в различных направлениях, то создаваемые капиллярными натяжениями давления взаимно уравновешиваются и производят как бы всестороннее сжатие бетона. В результате бетон получает объемную деформацию – усадку.

Следует отметить, что обе теории не исключают друг друга.

Свободная усадка. Свободной усадке цементного камня в начальный период твердения бетона препятствуют плотные заполнители, которые становятся внутренними связями, вызывающими в цементном камне начальные растягивающие напряжения [1]. По мере твердения геля образующиеся в нем кристаллические сrostки становятся такого же рода связями.

На величину усадки влияет зерновой состав заполнителей: при зернах разной крупности и меньшем объеме пустот усадка меньше. Всякие заполнители уменьшают усадку, причем имеет значение вид заполнителя. Усадка бетона, изготовленного на щебне, меньше, чем у бетона на гравии. Влияние заполнителя на уменьшение усадки тем меньше, чем меньше его способность к механическим деформациям, т.е. чем выше его модуль упругости. Величина усадки примерно обратно пропорциональна модулю упругости заполнителя.

Для бетонов на легких заполнителях это явление будет не столь выражено, чем для бетонов на плотных заполнителях, в связи с более низким значением модуля. По мере твердения геля кристаллические сrostки, образующиеся в легком бетоне, становятся такого же рода связями.

Следует отметить, что в конструкционных легких бетонах модуль упругости заполнителя обычно меньше модуля упругости цементного камня, поэтому напряжение в растворной части от усадки меньше напряжений в равнопрочном тяжелом бетоне. Одновременно усадка растворной части способна вызывать существенные напряжения в заполнителе. Например, для бетонов на граните при $E = 16,8$ ГПа усадка составляет 0,49 мм/м; для бетонов на известняке при $E = 7,1$ ГПа – 0,68 мм/м. Расчетный модуль упругости E_c для любого напряжения σ_c можно определить по приближенной зависимости, предложенной профессором Л.И. Онищekom, используя начальный модуль упругости E_0 :

$$E_c = E_0 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_0}{f_{cd}} \right).$$

Замечено, что усадка в бетонах с мелкозернистым пористым песком и пористым щебнем больше. У бетона на гранитном и известном щебне усадка меньше, чем у бетона на гравии или щебне из песчаника.

Необходимо отметить, что эти взаимодействия происходят в грубо неоднородной среде при разной величине зерен заполнителя, разных упругих свойствах цементного камня и заполнителей при наличии в цементном камне пор, а в бетоне – полостей, вызванных дефектами уплотнения. Поэтому величина и направление начальных напряжений усадки имеют случайный характер и подчиняются только статистическим закономерностям. В любом случае, начальные напряжения могут быть причиной микроразрушений в бетоне, причем микротрещины образуются преимущественно на поверхностях контакта заполнителей с цементным камнем.

Для керамзитобетона естественного твердения на кварцевом песке при продолжительности процесса 100 суток можно использовать формулу [3]

$$\varepsilon_{cs}(100) = 6,7 \times 10^{-6} (B\sqrt{t})^{1/2}.$$

Для описания процесса усадки во времени предлагается формула [3]

$$\varepsilon_{cs}(t) = \frac{4 \times t \times \varepsilon_{cs}(100)}{100 + 3 \times t},$$

где t – время, сут.

Для аналитического описания усадки бетона в любой момент времени можно воспользоваться эмпирической формулой [4]

$$\varepsilon_{cs}(t) = \varepsilon_{cs,lim} \cdot (1 - e^{-\lambda_{cs} t}),$$

где $\varepsilon_{cs,lim}$ – граничные деформации усадки (при $t = \infty$);

λ_{cs} – опытный параметр, характеризующий скорость усадки, сут⁻¹;

t – время, сут.

Граничные значения относительных деформаций усадки определяются следующим образом [4]:

$$\varepsilon_{cs,lim} = \varepsilon_{cs,m} \cdot \xi_1 \cdot \xi_2 \cdot \xi_3,$$

где $\varepsilon_{cs,m}$ – среднестатистическое значение $\varepsilon_{cs,lim}$ для условий, принятых за среднее (сечение образца 100×100 мм; относительная влажность воздуха 70%, возраст, с которого начинается учет усадки, 7 суток);

ξ_1, ξ_2, ξ_3 – коэффициенты, учитывающие влияние отклонения реальных условий работы бетона от принятых средних для возраста бетона в начале высыхания, размеров образца, относительной влажности среды соответственно.

При наличии данных о дозировке составляющих можно воспользоваться формулой [4]

$$\varepsilon_{cs,m} = 0,14 \cdot 10^{-6} (w + a)^{3/2},$$

где w и a – количество воды в замесе по объему и вместимость привлеченного воздуха в уплотненной бетонной смеси, л/м³ соответственно.

Первопричиной усадки цементного камня и, как следствие, бетона является уменьшение в геле количества свободной воды, которая расходуется на испарение и гидратацию цемента. Затем расходуется полусвязанная вода, которая окружает кристаллы гидросиликата кальция, что вызывает сближение этих кристаллов и дальнейшую усадку. Неравномерное высыхание бетона по объему приводит к неравномерной усадке, что в свою очередь ведет к возникновению неравномерных начальных усадочных напряжений. Открытые, быстро высыхающие поверхностные слои бетона испытывают растяжение, в то время как внутренние более влажные зоны, препятствующие усадке поверхностных слоев, оказываются сжатыми [1]. Свободная усадка способствует раскрытию трещин [5].

Существенное значение имеет также капиллярное давление в порах цементного камня. При контакте жидкости, находящейся в порах, со стенками капилляров силы притяжения, которые действуют между молекулами цементного скелета и жидкостью, заставляют ее подниматься по стенке капилляра, что приводит к искривлению поверхности жидкости – возникновению менисков (рисунок 1) [2]. Это создает капиллярное давление, которое сжимающе действует на стенки, ограничивающие жидкость.

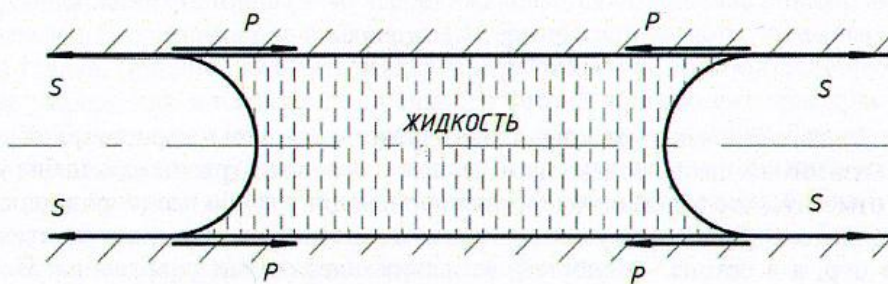


Рисунок 1. – Схема сил, обусловленных поверхностным натяжением менисков

Капиллярное давление в порах имеет довольно значительную величину и возрастает с уменьшением размеров пор. Поскольку микропоры в цементном камне расположены в разных направлениях, это давление взаимно уравнивается и действует как всестороннее сжатие, под влиянием которого также происходят объемные деформации.

Эти два фактора усадки зависят от интенсивности испарения, определяемого величиной влажностного перепада между бетоном и окружающей средой. Полная усадка цементного камня, высушенного до абсолютно сухого состояния, определяется только усадкой геля, поскольку усадка, вызываемая действием капиллярных сил, может полностью восстанавливать первоначальное положение.

Согласно положениям [6] полная усадка бетона состоит из двух частей – относительной деформации усадки при высыхании и относительной деформации аутогенной усадки:

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca},$$

где ε_{cs} – полная относительная деформация усадки;

ε_{cd} – относительная деформация бетона, обусловленная высыханием (испарение влаги);

ε_{ca} – относительная деформация аутогенной усадки.

Конечное значение усадки при высыхании легкого бетона [6]:

$$\varepsilon_{cd} = \varepsilon_{cd,0} \cdot \eta_3 \leq k_h \cdot \varepsilon_{cd,0},$$

где $\varepsilon_{cd,0}$ – номинальное значение усадки при высыхании, принимается по [6, таблица 3.2];

η_3 – коэффициент для определения усадки при высыхании;

k_h – коэффициент, который зависит от приведенного размера сечения h_0 .

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \cdot \left[(220 + 110\alpha_{ds1}) \cdot \exp(-\alpha_{ds2} \frac{f_{lcm}}{f_{cm0}}) \right] \cdot 10^{-6} \beta_{RH},$$

где α_{ds1} и α_{ds2} – коэффициенты, учитывающие вид цемента;
 $f_{cm0} = 10$ МПа;
 f_{lcm} – средняя прочность легкого бетона на сжатие, МПа;

$$\beta_{RH} = 1,55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right],$$

где RH – относительная влажность воздуха, %;
 $RH_0 = 100\%$.

Относительные деформации усадки во времени, обусловленные высыханием, определяется из выражения [6]

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_n \cdot \varepsilon_{cd,0};$$

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0,04 \cdot \sqrt{h_0^3}},$$

где t – возраст бетона на рассматриваемый период, сут;
 t_s – возраст бетона на начало усадки высыхания;
 h_0 – приведенный размер поперечного сечения, мм.

Максимальные значения относительной деформации аутогенной усадки в легких бетонах определяется по формуле [6]

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) + \varepsilon_{ca}(\infty),$$

где $\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5 \cdot (f_{lck} - 10) \cdot 10^{-6}$;
 $\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0,2t^{0,5})$;
 t – возраст бетона на рассматриваемый период, сут.

Если используется насыщенный водой (полностью или частично) легкий заполнитель (т.е. предварительно смоченный), значения аутогенной усадки будут значительно меньше.

Стесненная усадка. Усадка керамзитожелезобетонных конструкций зависит от класса легкого бетона, коэффициента армирования, свободной усадки бетона. Деформации усадки армированного образца ниже, чем неармированного, поскольку свободная усадка сдерживается арматурой, которая выполняет функцию внутренней связи (так как модуль упругости арматуры значительно выше модуля упругости керамзитобетона). Соответственно, чем выше коэффициент армирования, тем больше его влияние на усадку. Результаты исследований [7] показали уменьшение деформаций усадки в 2 раза при армировании бетонного образца по сравнению с эталонным неармированным образцом. При стесненной усадке в арматуре возникают сжимающие напряжения, а в бетоне – растягивающие.

Усадка цементного раствора в армированном бетоне первоначально сдерживается адсорбированной свободной водой в порах капилляров, а затем твердыми частицами: негидратированными частицами цемента, кристаллами гидроксида кальция, частично крупным заполнителем, а также арматурой [8].

В бетоне возникают растягивающие напряжения под влиянием разности свободной и стесненной усадки, причем наибольшие растягивающие напряжения возникают в местах контакта бетона с арматурой. Для определения теоретического влияния армирования на процесс усадки используются условие внутреннего равновесного состояния в любой момент времени и условие совместности деформаций [3]

$$\sigma_c(t) \cdot A_c = \sigma_s(t) \cdot A_s,$$

где $\sigma_c(t)$ – напряжения в бетоне в момент времени t ;
 $\sigma_s(t)$ – напряжения в арматуре в момент времени;
 A_c – площадь поперечного сечения бетона;
 A_s – площадь поперечного сечения арматуры.

$$\varepsilon_s(t) = \varepsilon_{cs}(t) - \varepsilon_c(t),$$

где $\varepsilon_s(t)$ – деформации сжатия в арматуре;

$\varepsilon_c(t)$ – деформации растяжения в бетоне;

$\varepsilon_{cs}(t)$ – деформации свободной усадки бетона к моменту времени t .

Для определения деформаций свободной усадки армированного керамзитобетона в любой момент времени в [3] предложена формула

$$\bar{\varepsilon}_{cs}(t) = 4 \cdot t \cdot \varepsilon_{cs}(100) \cdot \frac{e^{-20 \frac{t}{A_c}}}{100 + 3 \cdot t},$$

где $\varepsilon_{cs}(100)$ – свободная усадка бетона к моменту 100 суток.

В работах [7; 9] было изучено влияние симметричного и несимметричного армирования на усадку бетона с разным процентом армирования. Для определения деформаций усадки при несимметричном армировании авторы [9] использовали формулу

$$\varepsilon_{cs,RC} = \frac{\varepsilon_{cs}}{1 + \alpha_e \cdot \rho_s},$$

где $\varepsilon_{cs,RC}$ – усадка армированного образца;

ε_{cs} – свободная усадка бетона;

α_e – эффективное отношение модулей (отношение модуля упругости стали к модулю упругости бетона);

ρ_s – процент армирования.

В работе [10] исследовались деформации усадки керамзитобетонных образцов с разным процентом армирования. Согласно полученным опытным данным, конечные величины деформаций усадки в нормальных температурно-влажностных условиях составили от 0,4 до 0,6%.

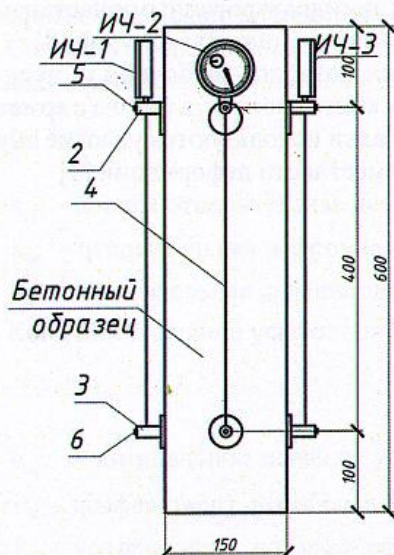
Начальные напряжения, возникающие вследствие усадки в керамзитобетоне, не учитываются при расчете армированных конструкций на прочность, хотя наличие данных напряжений может быть учтено применением коэффициента однородности [1; 7]. В преднапряженных конструкциях имеет место релаксация, которая способствует компенсации деформаций усадки.

Программа экспериментальных исследований развития усадочных деформаций в керамзитобетоне и керамзитожелезобетоне. С целью проведения экспериментальных исследований по изучению особенностей развития объемных усадочных деформаций в керамзитожелезобетоне составлена программа для эмпирического определения деформаций стесненной усадки армированного керамзитобетона.

Предполагается провести испытание опытных образцов в виде призм с размерами 150×150×600 мм, изготовленных из керамзитобетона классов LC16/18 – LC20/25, армированных продольной арматурой класса S500 и поперечной арматурой класса S240; продольные стержни диаметром 12, 14 и 16 мм.

Для каждой серии предусматривается 9 призмных образцов, из которых 3 образца предназначены для определения кратковременной призмной прочности керамзитобетона, 3 образца – для определения свободной усадки керамзитобетона и 3 образца – для определения стесненной усадки керамзитожелезобетона. Для определения кубиковой прочности предусмотрено изготовление 3-х образцов в виде кубов с длиной ребра 150 мм.

Деформации свободной усадки керамзитобетона планируется замерять посередине каждой грани испытываемого образца индикаторами часового типа с ценой деления 0,001 мм и 0,002 мм, которые крепятся к образцам при помощи стальных реперов, соединенных стержнями базы (рисунок 2).



ИЧ-1, 2, 3 – индикаторы часового типа;
2, 3 – стальной репер; 4 – стержень базы; 5, 6 – винт
Рисунок 2. – Схема для измерения свободной усадки
керамзитобетонного образца, оснащенного индикаторами
часового типа

Для определения деформаций **стесненной усадки** в заводских условиях изготовлен сварной каркас, состоящий из продольной арматуры диаметром 12 мм, длиной 590 мм класса S500 и поперечной арматуры диаметром 6 мм, длиной 145 мм класса S240 (рисунок 3).



Рисунок 3. – Арматурный каркас для измерения стесненной усадки

В продольной арматуре выполнены отверстия по концам с двух сторон (рисунок 4).



Рисунок 4. – Отверстия диаметром 5 мм в продольной арматуре

В отверстия диаметром 5 мм вставляются стальные переходные штуцеры высотой 40 мм и диаметром основания 40 мм (рисунок 5).



Рисунок 5. – Стальной переходной штуцер в продольной арматуре

Полученный сварной каркас вставляется в стальные формы и обетонируется. После бетонирования к испытываемому образцу приклеиваются стальные реперы в местах, где располагаются стальные переходные штуцеры, а также между стальными переходными штуцерами на каждой грани образца. Приклеиваемая поверхность репера обезжиривается органическим растворителем. Стержень базы диаметром 2,5 мм устанавливается в отверстия стальных реперов и закручивается винтами. Стальные реперы соединяются между собой стержнями базы длиной 400 мм. Индикаторы часового типа устанавливаются в отверстия верхних стальных реперов. При помощи показаний индикаторов фиксируются деформации бетона и продольной арматуры (рисунок 6).

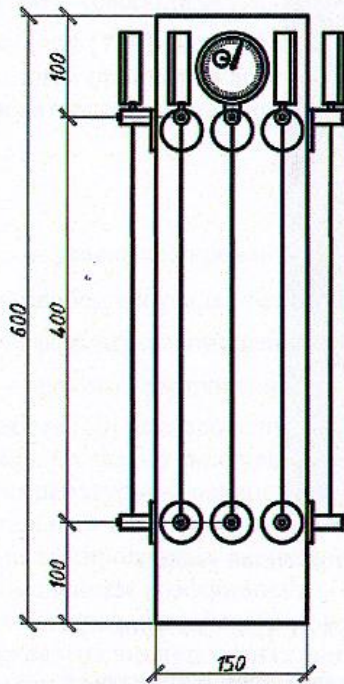


Рисунок 6. – Размещение индикаторов часового типа на опытном армированном образце

Деформации усадки можно рассматривать как сумму двух слагаемых: необратимых деформаций от старения геля, причем их постепенно затухающий рост может продолжаться в течение нескольких лет; обратимых деформаций, обуславливаемых капиллярными явлениями в микропорах благодаря наличию в них переменного количества свободной воды.

Обратимые деформации в зависимости от изменения влажности могут происходить и независимо от возраста бетона при всяком нарушении гидратического равновесия в микропорах. При этом знак деформации зависит от того, в какую сторону произошло изменение влажности.

Проведение запланированных экспериментальных исследований позволит выбрать теорию, наиболее точно описывающую процесс усадки в керамзитожелезобетоне, и усовершенствовать математическую модель расчета относительных деформаций стесненной усадки для керамзитобетонных, изготовленных на основе белорусских сырьевых материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мурашев, В.И. Железобетонные конструкции. Общий курс / В.И. Мурашев, Э.Е. Сигалов, В.Н. Байков – М. : Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1962. – 659 с.
2. Проектирование железобетонных конструкций : справочное пособие / А.Б. Голишев [и др.]. – Киев : Будівельник, 1985. – 496 с.
3. Бабич, Е.М. Конструкции из легких бетонов на пористых заполнителях / Е.М. Бабич. – Киев : Вища Школа, 1988. – 207 с.
4. Голишев, О.Б. Курс лекций з основ розрахунку конструкцій з опору залізобетону / О.Б. Голишев, А.Н. Бамбура. – Киев : Логос, 2004. – 340 с.
5. Коновалова, Б.В. К проблеме долговечности керамзитобетонных ограждающих конструкций гражданских зданий / Б.В. Коновалова // Информационная среда вуза : материалы X Междунар. науч.-техн. конф. – 2003. – С. 287–289.
6. Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings: EN 1992-1-1-2004. – CEN, Brussels, 2004. – 225 p.

Деформации стесненной усадки для бетона измеряются посередине на каждой грани испытываемого образца индикаторами при помощи стальных реперов, которые соединяются стержнями базы.

Отсчеты показаний производятся через сутки, затем на 3, 7, 14 суток, а далее раз в 2 недели до конца испытаний в соответствии с [11]. При проведении испытаний необходимо поддерживать нормальный температурно-влажностный режим окружающей среды (температуру 20 ± 2 °С и относительную влажность воздуха $60 \pm 5\%$). Испытания стесненной и свободной усадки керамзитобетона должны быть по продолжительности не менее 120 суток.

Заключение. Неучтенные усадочные деформации армированных элементов могут привести к увеличению ширины раскрытия трещин, ускорить степень износа и сократить ожидаемый срок службы конструкции [12; 13]. Например, в последние годы многие мосты страдают от чрезмерных деформаций, в том числе от деформаций усадки [14–17]. Эти дополнительные отклонения могут быть частично объяснены недостаточно корректным расчетом конструкций, не учитывающим неоднородную контракционную усадку в раннем возрасте, неравномерную влажностную усадку и неравномерное распределением компонентов смеси армированного керамзитобетона.

7. Бондаренко, В.М. Железобетонные и каменные конструкции / В.М. Бондаренко, Д.Г. Суворкин. – М. : Высшая школа, 1987. – 386 с.
8. Hobbs, D.W. Influence of aggregate restraint on the shrinkage of concrete / D.W. Hobbs // ACI Structural Journal, 1974. – Pp. 445–450.
9. Al-Kamyani, Z. Predicting shrinkage induced curvature in plain and reinforced concrete / Z. Al-Kamyani, M. Guadagnini, K. Pilakoutas // Engineering Structures. – Vol. 176, 2018. – P. 468–480.
10. Кравченко, С.А. Экспериментальное исследование усадки, ползучести и потерь напряжения в арматуре элементов из керамзитобетона на многокомпонентном вяжущем / С.А. Кравченко, А.А. Постернак // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2014. – № 56. – С. 124–128.
11. Бетоны. Методы определения деформаций усадки и ползучести : ГОСТ 24544-81*. – Переиздание (ноябрь 1987 г.) с Изменением № 1 (введено в действие с 01.05.1985, утверждено 24.04.1985) ; введ. 01.01.1982. – М. : Госстандарт, 1980. – 26 с.
12. Pan, Z. Uncertainty analysis of creep and shrinkage effects in long-span continuous rigid frame of Sutong bridge / Z. Pan, C.C. Fu, Y. Jiang // Journal of Bridge Engineering. – Vol. 16 (2), 2011. – P. 248–258.
13. Maekawa, K. Long-term deformational simulation of PC bridges based on the thermo-hygro model of micro-pores in cementitious composites / K. Maekawa, N. Chijiwa, T. Ishida // Cement and Concrete Research, Vol. 41 (12), 2011. – Pp. 1310–1319.
14. Bažant, Z. P. Excessive long-time deflections of prestressed box girders. II: numerical analysis and lessons learned / Z. P. Bažant, Q. Yu, G-H. Li // Journal of Structural Engineering, Vol. 138 (6), 2012. – P. 687–696.
15. Bažant, Z.P. Excessive long-time deflections of prestressed box girders. I: record-span bridge in Palau and other paradigms / Z. P. Bažant, Q. Yu, G-H. Li // Journal of Structural Engineering. – Vol. 138 (6), 2012. – P. 676–687.
16. Huang, H. Effect of section geometry on development of shrinkage-induced deformations in box girder bridges / H. Huang, R. Garcia, M. Guadagnini, K. Pilakoutas // Materials and Structures. – Vol. 50, 2017. – P. 1–14.
17. Tanimura, M. Serviceability performance evaluation of RC flexural members improved by using low-shrinkage high-strength concrete / M. Tanimura, R. Sato, Y. Hiramatsu // Journal of Advanced Concrete Technology. – Vol. 5 (2), 2007. – P. 149–60.

Поступила 21.07.2020

FEATURES OF DETERMINING RESTRICTED SHRINKAGE OF REINFORCED CLAYDITE-CONCRETE

S. SEMENYUK, YU. MASKALKOVA, V. RZHEVUTSKAYA

The article presents an analytical review of native and foreign investigations of the free and restricted shrinkage features for concrete on dense and porous aggregates. Two different theories are considered, satisfactorily describe the shrinkage process and are not mutually exclusive. The issues related to the influence of aggregate components, cement, water-cement ratio and additives on shrinkage of claydite-concrete are highlighted. The proposals on accounting for shrinkage deformations in claydite-concrete and reinforced claydite-concrete are considered. The technique has been developed for specimens' investigations in the form of prisms reinforced with longitudinal nonprestressed reinforcement using indicating gage for measuring shrinkage strains. The suggested technique is required to more accurately determine the process of accumulation of volumetric shrinkage strains and improve the mathematical model for calculating the relative shrinkage strains in claydite-concrete and reinforced claydite-concrete.

Keywords: shrinkage, restricted shrinkage, claydite-concrete, reinforced claydite-concrete, volumetric deformations.