

УДК 69.07

С.Г. Парфенов, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО "Брянский государственный инженерно-технологический университет" (Брянск, Россия) (e-mail: parfenovsk@mail.ru)

В.Е. Мощенков, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО "Брянский государственный инженерно-технологический университет" (Брянск, Россия) (e-mail: vmoshhenkov@mail.ru)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИИ ПОЛЗУЧЕСТИ И УСАДКИ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА

В данной статье рассмотрены процессы ползучести и усадки мелкозернистых бетонов, упруго - пластические (деформативные) свойства которых при кратковременном нагружении несколько отличаются от аналогичных свойств у обычных тяжелых бетонов. Экспериментальное изучение деформаций усадки и ползучести мелкозернистых бетонов на основе песков с различными модулями крупности позволяет сопоставить потери предварительного напряжения от усадки и ползучести бетона. Обычно наблюдается суммарное влияние этих факторов, что значительно усложняет изучение процессов, происходящих в бетоне при длительных воздействиях.

Проанализированы результаты экспериментальных исследований бетонных призм при различных уровнях начальных напряжений в интервале $\eta = \sigma_c / R_{np} = 0,21 \div 0,73$, возрастах загрузений по времени $t = 14$ и 28 суток и различных свойствах бетонной смеси. Свойства бетонной смеси варьировались путем использования песков различного модуля крупности. Так же, для определения деформаций усадки и ползучести от длительных нагрузок, были проведены испытания образцов при длительности выдерживания под нагрузкой 14, 73 и 180 суток. Экспериментальные данные представлены в виде графиков и систематизированы в таблице. Проведенный анализ позволяет проследить влияние уровней относительных напряжений в бетоне на деформации ползучести, а так же определить границу линейной и нелинейной ползучести и соответствующие ей напряжения в бетоне. Аналитическое описание нелинейных деформаций выполнено при помощи методик, предложенных Н.Х. Арутюняном и И.И. Улицким. На основании произведенных вычислений даны рекомендации по практическому применению упрощенной методики решения задач с учетом нелинейной ползучести бетона.

Ключевые слова: деформации усадки, деформации ползучести, мелкозернистый бетон, ползучесть.

DOI: 10.21869/2223-1560-2017-21-4-13-20

Ссылка для цитирования: Парфенов С.Г., Мощенков В.Е. Экспериментальные исследования деформации ползучести и усадки мелкозернистого бетона // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 4(73). С. 13-20.

В настоящее время еще нет единой теории, объясняющей явления ползучести на физико-химической основе. Вероятно, наиболее правильно считать, что ползучесть зависит от ряда факторов [2,4,7,8]. При низких уровнях обжатия $\eta = \sigma_s / R$ – это вязкость, изменение влажности в процессе высыхания и воздействия внешней нагрузки, а также капиллярные явления.

При высоких уровнях обжатия существенное влияние имеет также образование и развитие микротрещин.

Современными экспериментальными исследованиями установлено, что на зна-

чения деформации усадки и ползучести влияют:

- свойства и соотношение по массе исходных материалов, методы укладки и обработки бетонной смеси;
- температура и влажность окружающей среды и самого бетона;
- значение напряжений и вид напряженного состояния;
- возраст бетона в момент нагружения и длительность нагружения;
- изменение прочностных и деформативных характеристик во времени и ряд других факторов.

Обычно наблюдается суммарное влияние этих факторов, что значительно усложняет изучение процессов, происходящих в бетоне при длительных воздействиях.

Мелкозернистый бетон имеет деформативные свойства при кратковременном нагружении, несколько отличающиеся от аналогичных свойств у тяжелого обычного бетона.

Отличия деформативных свойств мелкозернистого бетона при длительном действии нагрузки отмечали многие исследователи.

Изучение деформаций усадки и ползучести проводилось авторами на образцах из мелкозернистого бетона при различных уровнях начальных напряжений $\eta = \sigma_e / R_{np} = 0,21 \div 0,73$ и при разных возрастах загрузки $t=14$ и 28 суток.

Экспериментальное изучение деформаций усадки и ползучести мелкозернистых бетонов на основе песков с различными модулями крупности позволяет сопоставить потери предварительного напряжения от усадки и ползучести бетона. Для сравнения деформаций усадки и ползучести мелкозернистого бетона различных составов в экспериментах определялись следующие величины:

– $\varphi_t = \sigma_{n(t)} / \varepsilon_0$ – характеристика ползучести;

– φ_∞ – предельное значение характеристики ползучести;

– $C_{(t,\tau)} = \varepsilon_{n(t)} / \sigma_\delta$ – мера ползучести бетона;

– $C_{(t,\infty)}$ – предельная мера ползучести бетона;

– $\varepsilon_{y\infty}$ – предельная относительная деформация усадки к моменту ее затухания.

В работе И.И. Улицкого [9] для мелкозернистого бетона естественного твердения средние значения величин $\varphi_\infty = 2,5$ и $\varepsilon_{y\infty} = 50 \cdot 10^{-6}$.

На рис. 1, 2 приведены графики изменения относительных деформаций призм, нагруженных в возрасте 14 и 28 суток при различных начальных напряжениях, на рис. 3 – зависимости между деформациями ползучести и начальными относительными напряжениями при длительности выдерживания под нагрузкой 14, 73 и 180 суток.

Как видно из рис. 3, переход линейной ползучести в нелинейную имеет место при одном и том же относительном напряжении, равном примерно $\sigma = 0,5R_{np}$.

Анализ кривых, приведенных на рисунке 4, показывает, что нарастание прочности бетона во времени приводит к изменению относительного напряжения в бетоне после его загрузки.

Для вычисления условно предельных значений относительных деформаций усадки и ползучести использовалась методика ГОСТ 24544-81*[3]. Для этого вычислялись средние значения деформаций усадки и ползучести для различных периодов времени, их дисперсии, корреляционные моменты и коэффициенты корреляции. После этого строилась линия регрессии в виде $\Delta t / \varepsilon_{in}(t) = A + \Delta t \cdot B$.

В таблице приведены предельные значения относительных деформаций усадки и ползучести при различных уровнях напряжения, а также предельные значения характеристики φ_∞ и меры ползучести мелкозернистого бетона $C_{(t,\infty)}$.

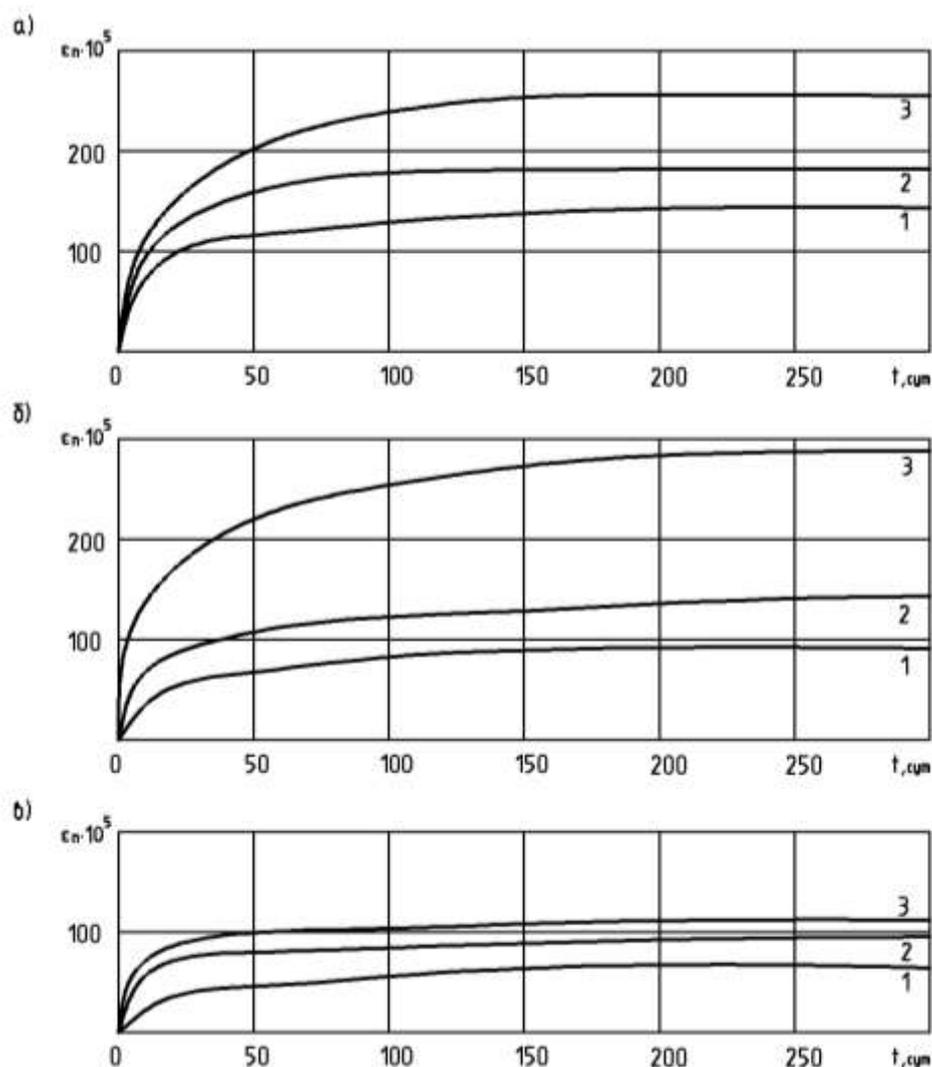


Рис. 1. Относительные деформации ползучести мелкозернистого бетона, загруженного в возрасте 14 суток: а – I серия: 1 – $\eta=0,26$; 2 – $\eta=0,38$; 3 – $\eta=0,47$; б – II серия: 1 – $\eta=0,19$; 2 – $\eta=0,33$; 3 – $\eta=0,59$; в – III серия: 1 – $\eta=0,22$; 2 – $\eta=0,38$; 3 – $\eta=0,49$

Предельные значения характеристики φ_{∞} ползучести определялись как отношение условно предельных деформаций ползучести, полученных опытным путем, к упругим деформациям в момент нагружения.

Анализируя результаты таблицы, можно проследить влияние уровней относительных напряжений в бетоне η на деформации ползучести. Для первой серии образцов при нагружении их в возрасте 14 суток при увеличении уровня обжатия соблюдается и при нагружении в

возрасте 28 суток. При увеличении уровней обжатия с 0,34 до 0,71 деформации ползучести увеличились в 1,74 раза.

Возрастают относительные деформации ползучести также и с увеличением возраста бетона и соответственно его прочности. Так, во второй серии, при одинаковых уровнях обжатия $\eta = 0,40$ при увеличении возраста бетона при нагружении с 14 до 28 суток деформации ползучести увеличились с $149,1 \cdot 10^{-5}$ до $226,8 \cdot 10^{-5}$, т.е. в полтора раза. Прочность бетона за этот же период возросла с 20,8 МПа до 25,3 МПа, т.е. в 1,2 раза.

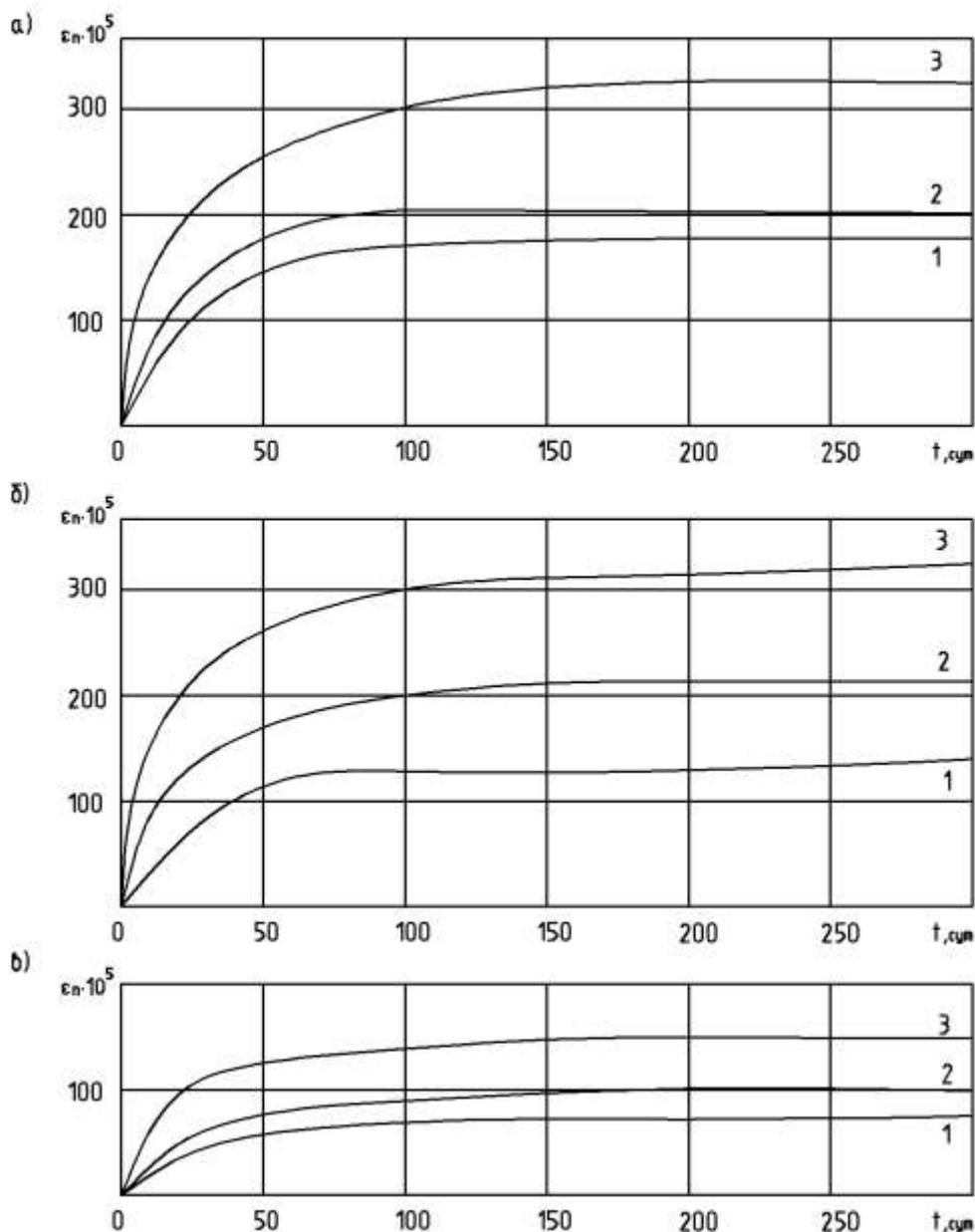


Рис. 2. Относительные деформации ползучести мелкозернистого бетона, загруженного в возрасте 28 суток: а – I серия: 1 – $\eta=0,26$; 2 – $\eta=0,37$; 3 – $\eta=0,54$;
 б – II серия: 1 – $\eta=0,21$; 2 – $\eta=0,32$; 3 – $\eta=0,48$; в – III серия: 1 – $\eta=0,21$; 2 – $\eta=0,33$; 3 – $\eta=0,47$

Для получения равнопрочного бетона на основе песков с различными модулями крупности требуется разное количество цемента. Расход цемента оказывает большое влияние на деформации усадки и ползучести. Рассмотрим и сравним I серию, изготовленную на основе песка с $M_k = 2,0-2,2$, и III серию – песок $M_k = 2,5-2,6$.

При примерно одинаковом уровне обжатия $\eta = 0,47-0,48$ с уменьшением модуля крупности песка деформации ползучести увеличились более чем в два раза. Следовательно, при изготовлении конструкций из мелкозернистого бетона следует большое внимание обращать на качество применяемого песка, и по возможности применять пески с модулями крупности $M_k \geq 2,1-2,2$.

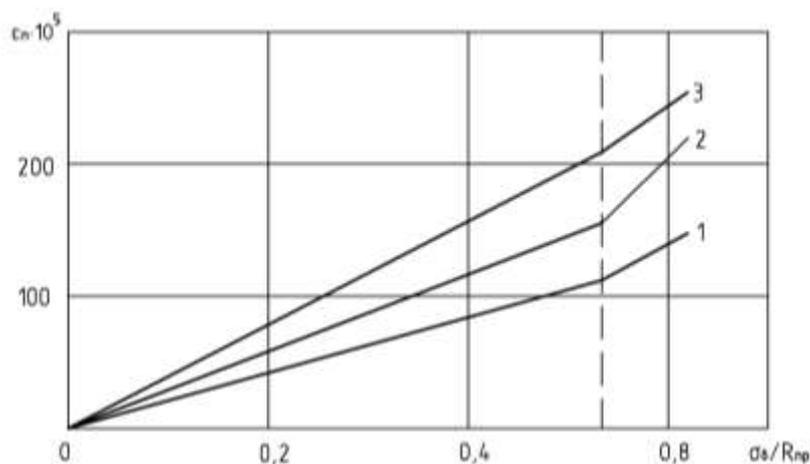


Рис. 3. Зависимость деформаций ползучести от длительности наблюдений: 1 – 14 суток; 2 – 73 суток; 3 – 180 суток

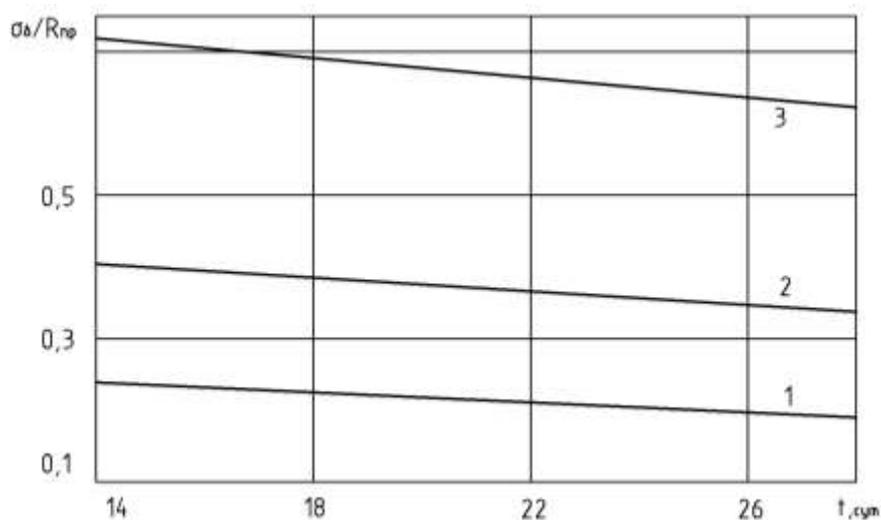


Рис. 4. Снижение относительных величин напряжений в бетоне: 1 – $\eta = 0,23$; 2 – $\eta = 0,40$; 3 – $\eta = 0,73$

Отчетливо прослеживается граница линейной и нелинейной ползучести при напряжениях в бетоне, примерно равным $\sigma_{\delta} = 0,5R_{np}$.

Для описания нелинейных деформаций воспользуемся предложениями Н.Х. Арутюняна [1] и И.И. Улицкого [9]: $\varepsilon_{\delta}(t) = \sigma_0(\tau_1) \cdot C(t, \tau_1) + \beta \sigma_{\delta}^2(\tau_1) \cdot C(t, \tau_1)$, (1) где $\sigma_{\delta}(\tau_1) > 0,3R_{np}$ – действующие в бетоне начальные напряжения;

$C(t, \tau_1)$ – мера ползучести бетона;

β – параметр нелинейности.

Параметр нелинейности можно определять по таблице 6.24 [9] или опытным путем по формуле

$$\beta = \frac{1}{\sigma_n(t)} \left[\frac{\varepsilon_{пн}(t) \cdot \sigma_n(t)}{\varepsilon_{пл}(t) \cdot \sigma_n(t)} - 1 \right], \quad (2)$$

где $\varepsilon_{пл}(t), \varepsilon_{пн}(t)$ – соответственно линейные и нелинейные деформации ползучести;

$\sigma_n(t), \sigma_n(t)$ – напряжения в бетоне, соответствующие деформациям $\varepsilon_{пл}(t)$ и $\varepsilon_{пн}(t)$.

Предельные значения относительных деформаций усадки и ползучести
мелкозернистого бетона

Серия образцов	$\varepsilon_{у\infty} \cdot 10^5$	Возраст нагружения бетона t, сут	Уровень нагружения $\sigma_{\delta} / R_{пр}$	Начальные деформации $\varepsilon_{нач} \cdot 10^5$	$\varepsilon_{п\infty} \cdot 10^5$	φ_{∞}	$C_{(t,\infty)} \cdot 10^{-1}, \text{ МПа}^{-1}$
I	131,8	14	0,37	33	142,6	4,32	3,43
			0,53	61	199,2	3,26	2,59
			0,63	80	269,2	3,36	2,67
		28	0,34	34	197,6	5,81	4,50
			0,48	56	216,9	3,87	2,98
			0,71	103	344,1	3,34	2,57
II	140,4	14	0,23	27	100,6	3,72	2,84
			0,40	58	149,1	2,57	1,96
			0,73	150	304,7	2,03	1,55
		28	0,27	40	143,1	3,58	2,67
			0,40	65	226,8	3,49	2,60
			0,61	117	336,6	2,87	2,14
III	87,8	14	0,28	16	82,3	5,14	3,32
			0,48	31	99,9	3,22	2,08
			0,63	47	122,3	2,60	1,68
		28	0,31	24	78,1	3,25	1,98
			0,47	41	99,0	2,41	1,49
			0,68	71	169,5	2,38	1,45

Полные деформации при переменных напряжениях можно определить по формуле:

$$\varepsilon_{\delta}(t) = \varepsilon_{\delta}(t)_{\text{лин}} + \varepsilon_{\delta}(t)_{\text{нел}}. \quad (3)$$

Принимаем по аналогии с линейной задачей закон изменения напряжений во времени

$$\sigma_{\delta_d}(t) = \sigma_{\delta_d} \left[1 - e^{-\alpha_0(t-\tau)} \right], \quad (4)$$

который обусловлен перераспределением усилий в процессе деформирования. Мэру ползучести записываем по теории упруго-ползучего тела

$$C(t, \tau) = C_0 \left[1 - e^{-\alpha_1(t-\tau)} \right] + A \left[e^{-\alpha_2(\tau-\tau_1)} - e^{-\alpha_2(t-\tau_1)} \right]. \quad (5)$$

Заменяя меру ползучести $C(t, \tau_1)$ характеристикой ползучести φ_1 , окончательно имеем выражение для полных деформаций бетона с учетом нелинейности:

$$\varepsilon_{\delta}(t) = \frac{\sigma_{\delta}(\tau_1)}{E_{\delta}} (1 + \varphi_1') + \frac{\sigma_{\delta_d}}{E_{\delta}} \gamma_1'. \quad (6)$$

Составляя условие равновесия и совместимости дополнительных деформаций бетона и арматуры, вызванных процессами усадки и ползучести, и с помощью выражения (6) можно определять дополнительные напряжения в арматуре и бетоне от усадки и нелинейной ползучести, потери предварительного напряжения арматуры от усадки и ползучести бетона, а также оценивать текущее напряженно-деформированное состояние цементов.

Решение задач с учетом нелинейной ползучести значительно упрощается, если предположить, что параметр нелинейности не изменяется во времени. В работе И.И. Улицкого [9] была произведена оценка погрешности, которая вносится при допущении о постоянстве во времени

параметра нелинейности β . Анализ показал, что расхождение теоретических деформаций ползучести с опытными не превышает 15%.

Вывод

Принятые предложения о постоянстве параметра β во времени являются вполне допустимыми для практического применения в расчетах конструкций по деформациям.

Список литературы

1. Арутюнян Н.Х., Манжиров А.В. Контактные задачи теории ползучести. Ереван: НАН РА, 1999. 318 с.
2. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Расчетные модели силового сопротивления железобетона. М.: Изд-во АСВ, 2004. 472 с.
3. ГОСТ 24544-81*. Бетоны. Методы определения деформаций усадки и ползучести. Введ. 1982-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1982.
4. Лившиц Я.Д. Расчет железобетонных конструкций с учетом влияния усадки и ползучести бетона: учеб. пособие для строит. спец. вузов. 2-е изд., перераб. и доп. Киев : Вища шк., 1976. 280 с.
5. Методические рекомендации по расчету напряженного состояния железобетонных конструкций транспортных сооружений с учетом ползучести и усадки бетона / ВНИИТС. М., 1987.

бетонных конструкций транспортных сооружений с учетом ползучести и усадки бетона / ВНИИТС. М., 1987.

6. Прокопович, И.Е. Барановский В.И., Невелик П.Л. Об учете влияния размеров элемента, влажности среды и нелинейной составляющей ползучести бетона при расчете релаксации и потерь преднапряжения // Строительные конструкции: респ. межвед. научн.-техн. сб. Киев: Будивельник, 1986. Вып. 39.

7. Тамразян А.Г., Есаян С.Г. Механика ползучести бетона: монография. М.: МГСУ, 2013. 524 с.

8. Тамразян А.Г. К теории расчета по предельным состояниям на основе реологической механики железобетона // Бетон и железобетон. 1999. №3.

9. Улицкий И.И., Чжан-Чжун-Яо, Голышев А.Б. Расчет железобетонных конструкций с учетом длительных процессов. Киев: Госстройиздат УССР, 1960. 495 с.

10. Хасин В.Л. К расчету железобетонных элементов с учетом нелинейной ползучести бетона // Пути повышения производительности труда, сокращения сроков проектирования и строительства транспортных сооружений: сб. научн. тр. М.: ЩИИС, 1986.

Поступила в редакцию 27.06.17

UDC 69.07

S.G. Parfenov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Bryansk State Engineering-Technological University (Bryansk, Russia) (e-mail: parfenovsk@mail.ru)

V. Ye. Moschenkov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Bryansk State Engineering-Technological University (Bryansk, Russia) (e-mail: vmoshhenkov@mail.ru)

EXPERIMENTAL STUDY OF CREEP AND SHRINKAGE STRAINS IN FINE-AGGREGATE CONCRETES

The paper studies creep and shrinkage processes running in fine-aggregate concretes with plasto-elastic properties (deformations) under short-time loading are different from those of standard heavy concretes. Experimental studies of creep and shrinkage strains in fine-aggregate concretes that are based on sands with different fineness

modulus permit to compare prestress losses resulting from the creep and shrinkage of concrete. Usually these factors produce an aggregate effect, which makes the study of the processes that run in concrete under long-time influence noticeably complicated.

This paper contains analysis results obtained by experimental studies of concrete prisms at different initial strains in the range of $\eta = \sigma_{\varepsilon} / R_{np} = 0,21 \div 0,73$, with loading age of $t = 14$ or 28 days and different properties of concrete mixes. Concrete mix properties were modified by using sands with different fineness modulus. Likewise in order to determine creep and shrinkage deformations due to long-time loads the samples were tested under stress during 14, 73 and 180 days. All experimental data have been systematized in tables and are represented by diagrams. The analysis has helped to investigate the effects of relative strains on the creep deformation in concrete and to define the boundary line between linear and non-linear creep with relation to the stresses in concrete. Analytical description of non-linear deformations was performed with the help of N.H.Arutyunyan' and I.I.Ulitsky methods. The resultant calculations formed a basis for the recommendations to simplify problem solving methods considering non-linear creep of concrete.

Key words: shrinkage deformation, creep deformation, fine-aggregate concrete, creep.

DOI: 10.21869/2223-1560-2017-21-4-13-20

For citation: Parfenov S.G., Moschenkov V. Ye. Experimental Study of Creep and Shrinkage Strains in Fine-Aggregate Concretes. Proceedings of the Southwest State University, 2017, vol. 21, no 4(73), pp. 13-20 (in Russ.).

Reference

1. Arutjunjan N.H., Manzhairov A.V. Kontaktnye zadachi teorii polzuchesti. Erevan: NAN RA, 1999, 318 p.
2. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. Raschetnye modeli silovogo soprotivlenija zhelezobetona. M.: Izd-vo ASV, 2004, 472 p.
3. GOST 24544-81*. Betony. Metody opredelenija deformatsij usadki i polzuchesti. Vved. 1982-01-01. M.: Izd-vo standartov, 1982.
4. Livshic Ja.D. Raschet zhelezobetonnih konstrukcij s uchetom vlijanija usadki i polzuchesti betona: ucheb. posobie dlja stroit. spec. vuzov. 2-e izd., pererab. i dop. Kiev: Vishha shk., 1976, 280 p.
5. Metodicheskie rekomendacii po raschetu naprjazhennogo sostojanija zhelezo-betonnih konstrukcij transportnyh sooruzhenij s uchetom polzuchesti i usadki betona/ VNIITS. M., 1987.
6. Prokopovich, I.E. Baranovskij V.I., Nevelik P.L. Ob uchete vlijanija razmerov jelementa, vlazhnosti sredy i nelinejnoj sostavljajushhej polzuchesti betona pri raschete relaksacii i poter' prednaprjazhenija. Stroitel'nye konstrukcii : resp. mezhved. nauchn.-tehn. sb. Kiev: Budivel'nik, 1986, vyp. 39.
7. Tamrazjan A.G., Esajan S.G. Mehanika polzuchesti betona: monografija. M.: MGSU, 2013, 524 p.
8. Tamrazjan A.G. K teorii rascheta po predel'nym sostojanijam na osnove reologicheskoj mehaniki zhelezobetona. Beton i zhelezobeton, 1999, no. 3.
9. Ulickij I.I., Chzhan-Chzhun-Jao, Golyshev A.B. Raschet zhelezobetonnih konstrukcij s uchetom dlitel'nyh processov. Kiev: Gosstrojizdat USSR, 1960, 495 p.
10. Hasin V.L. K raschetu zhelezobetonnih jelementov s uchetom nelinejnoj polzuchesti betona. Puti povyshenija proizvoditel'nosti truda, sokrashhenija srokov proektirovanija i stroitel'stva transportnyh sooruzhenij: sb. nauchn. tr. M.: ShhIIS, 1986.