

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ПАРАМЕТРА НЕЛИНЕЙНОСТИ
ПРИ РАСЧЕТЕ ДЕФОРМАЦИЙ ПОЛЗУЧЕСТИ
И УСАДКИ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА**

**EXPERIMENTAL STUDY
OF NONLINEARITY PARAMETER
IN THE CALCULATION OF CREEP STRAIN
AND SHRINKAGE OF FINE-GRAINED CONCRETE**

А.Г. ТАМРАЗЯН, С.Г. ПАРФЕНОВ
A.G. TAMRAZYAN, S.G. PARFENOV

(Московский государственный строительный университет,
Брянский государственный инженерно-технологический университет)
(Moscow State University of Civil Engineering,
Bryansk State Engineering and Technological University)
E-mail: tamrazian@mail.ru

В статье рассмотрены процессы ползучести и усадки мелкозернистых бетонов. Проанализированы результаты экспериментальных исследований бетонных призм при различных уровнях начальных напряжений в интервале $\eta = \sigma/R_b = 0,21 \dots 0,73$, возрастах загрузений $t=14$ и 28 суток и различных свойствах бетонной смеси. Свойства бетонной смеси варьировались путем использования песков различного модуля крупности. Также для определения деформаций усадки и ползучести были проведены испытания образцов при длительности выдерживания под нагрузкой $14, 73$ и 180 суток. Проведен анализ влияния уровней относительных напряжений в бетоне на деформации ползучести, а также определена граница линейной и нелинейной ползучести и соответствующие ей напряжения в бетоне. Даны рекомендации по практической методике решения задач с учетом нелинейной ползучести бетона.

In the article the processes of creep and shrinkage of fine-grained concrete. We analyzed the results of experimental studies of concrete prisms under different levels of initial stress in the range of $\eta = \sigma/R_b = 0,21 \dots 0,73$, ages load cases $t=14$ and 28 of day and various properties of the concrete mix. Properties of concrete was varied by the use of sands of different fineness modulus. Also, for determination of shrinkage deformations and creep from prolonged exertion, was tested the samples when the duration of incubation under load $14, 73$ and 180 days. The analysis to observe the influence of the relative levels of stresses in the concrete creep strain, as well as to determine the boundary of linear and nonlinear creep and associated stress in the concrete. Recommendations are given on the practical method of solving problems taking into account the nonlinear creep of concrete.

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

Keywords: shrinkage deformations, creep strains, fine-grained concrete, nonlinear parameter, creep.

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]. При низких уровнях обжатия $\eta = \sigma_b/R_b$ – 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 значения 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 загрузки и длительность загрузки;

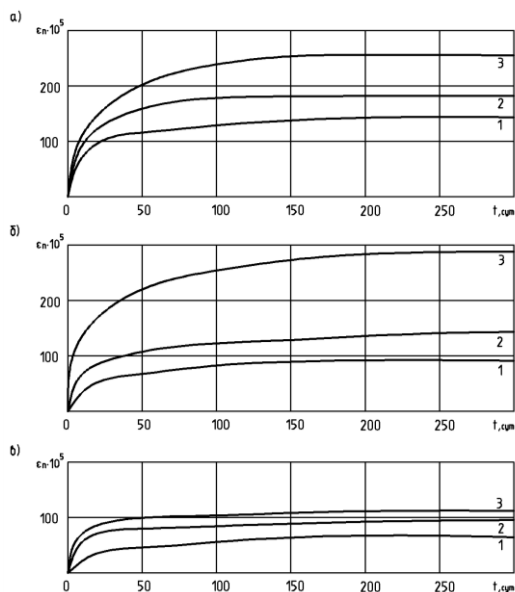


Рис. 1

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 мелкозер-

- 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 [5...8].

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

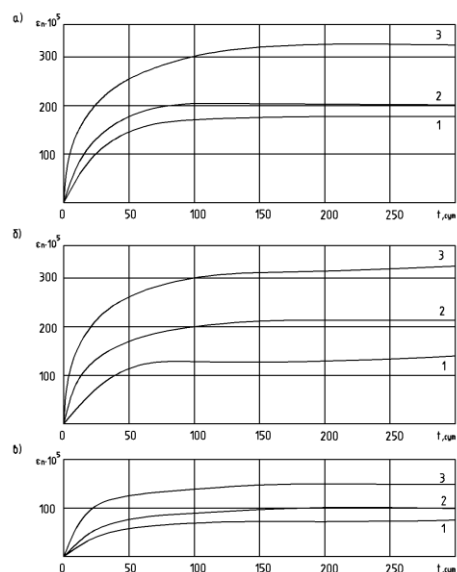


Рис. 2

нистого 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 (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 – $\eta=0,49$) и рис. 2 (относительные деформации ползучести мел-

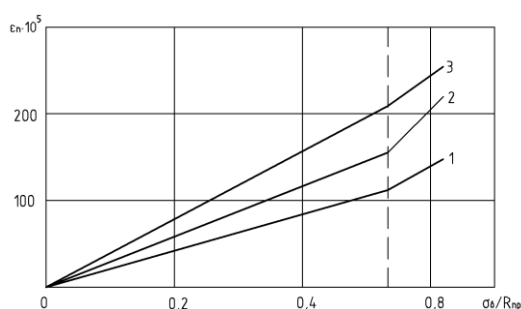


Рис. 3

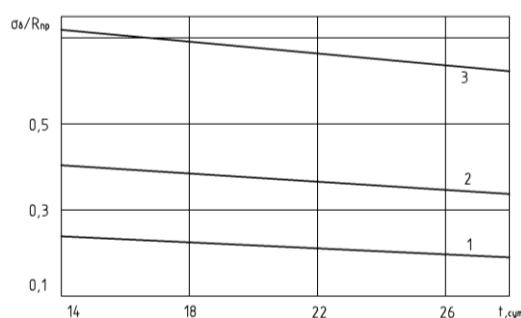


Рис. 4

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

Анализ кривых, приведенных на рис. 4 (снижение относительных величин напряжений в бетоне: 1 – $\eta=0,23$; 2 – $\eta=0,40$; 3 – $\eta=0,73$) 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*. 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 $\Delta t / \varepsilon_m(t) = A + \Delta t B$.

козернистого 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 – $\eta=0,47$) приведены графики изменения относительных деформаций призм, загруженных в возрасте 14 и 28 суток при различных начальных напряжениях. На рис. 3 (зависимость деформаций ползучести от длительности нагружений: 1 – 14 суток; 2 – 73 суток; 3 – 180 суток) представлены зависимости между деформациями ползучести и начальными относительными напряжениями при различной длительности выдерживания под нагрузкой.

В табл. 1 приведены предельные значения относительных деформаций усадки и ползучести при различных уровнях напряжения, а также предельные значения характеристики φ_{∞} и меры ползучести мелкозернистого бетона $C_{(t,\infty)}$.

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

Анализируя результаты табл. 1, можно проследить влияние уровней относительных напряжений в бетоне η на деформации ползучести бетона. Для первой серии образцов при загрузении их в возрасте 14 суток при увеличении уровня обжатия соблюдается и при загрузении 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 загрузении с 14 до 28 суток деформа-

ции ползучести увеличились с $149,1 \cdot 10^{-5}$ до $226,8 \cdot 10^{-5}$, то есть в полтора раза. Прочность бетона за этот же период возросла с 20,8 до 25,3 МПа, то есть в 1,2 раза.

Т а б л и ц а 1

Серия образцов	$\varepsilon_{уоч} \cdot 10^5$	Возраст нагружения бетона t, сут.	Уровень нагружения σ_{δ} / R_b	Начальные деформации $\varepsilon_{нач} \cdot 10^5$	$\varepsilon_{псч} \cdot 10^5$	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

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 $\eta = 0,47 \dots 0,48$ 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 $M_k \geq 2,1 \dots 2,2$.

Отчетливо прослеживается граница линейной и нелинейной ползучести при напряжениях в бетоне, примерно равным $\sigma = 0,5 R_b$.

Для описания нелинейных деформаций воспользуемся предложениями Н.Х. Арутюняна [1] и И.И. Улицкого [9]:

$$\varepsilon_{\delta}(t) = \sigma_0(\tau_1)C(t, \tau_1) + \beta \sigma_{\delta}^2(\tau_1)C(t, \tau_1), \quad (1)$$

где $\sigma_{\delta}(\tau_1) > 0,3 R_{np}$ – действующие в бетоне начальные напряжения; $C(t, \tau_1)$ – мера ползучести бетона; β – параметр нелинейности.

Параметр нелинейности можно определять по [9, табл. 6.24] или опытным путем по формуле:

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

где $\varepsilon_{лн}(t), \varepsilon_{нн}(t)$ – соответственно линейные и нелинейные деформации ползучести; $\sigma_n(t), \sigma_{нн}(t)$ – напряжения в бетоне, соответствующие деформациям $\varepsilon_{лн}(t)$ и $\varepsilon_{нн}(t)$.

Полные деформации при переменных напряжениях можно определить по формулам:

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

Принимаем по аналогии с линейной задачей закон изменения напряжений во времени:

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

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

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

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

$$\varepsilon_{\delta}(t) = \frac{\sigma_{\delta}(\tau_1)}{E_{\delta}} (1 + \phi'_t) + \frac{\sigma_{\delta_a}}{E_{\delta}} \gamma'_1. \quad (6)$$

ВЫВОДЫ

Составляя условие равновесия и совместности 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.

Решение задач с учетом нелинейной ползучести значительно упрощается, если предположить, что параметр нелинейности не изменяется во времени. В работе [9] была проведена оценка погрешности, которая вносится при допущении о постоянстве во времени параметра нелинейности β . Анализ показал, что расхождения теоретических деформаций ползучести с опытными не превышает 15%. Таким образом, принятые предложения о постоянстве параметра β во времени является вполне допустимым для практического применения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арутюнян Н.Х., Манжиров А.В. Контактные задачи теории ползучести. – НАН РА, 1999.
2. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Расчетные модели силового сопротивления железобетона. – М.: АСВ, 2004.
3. Тамразян А.Г., Есаян А.Г. Механика ползучести бетона. – М.: МГСУ, 2013.
4. Тамразян А.Г. К теории расчета по предельным состояниям на основе реологической механики железобетона // Бетон и железобетон. – 1999, №3. С.15...18.
5. Тамразян А.Г. Бетон и железобетон: проблемы и перспективы // Промышленное и гражданское строительство. – 2014, № 7. С. 51...54.
6. Тамразян А.Г., Филимонова Е.А. О влиянии снижения жесткости железобетонных плит перекрытий на несущую способность при длительном действии нагрузки // Промышленное и гражданское строительство. – 2012, № 7. С. 30...32.
7. Крылов С.Б., Арленинов П.Д. Метод линеаризации при компьютерном моделировании явления ползучести бетона и железобетона // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – V. 6. №1-2, 2010. P.144...145.
8. Санжаровский Р.С. Проблемы теории ползучести // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2013, №3. С.28...34.
9. Улицкий И.И., Чжан-Чжун-Яо, Гольшев А.Б. Расчет железобетонных конструкций с учетом длительных процессов. – Киев: Госстройиздат УССР, 1960.

REFERENCES

1. Arutyunyan N.H., Manzhirrov A.V. Kontaktnye zadachi teorii polzuchesti. – NAN RA, 1999.
2. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. Raschetnye modeli silovogo soprotivleniya zhelezobetona. – M.: ASV, 2004.
3. Tamrazyan A.G., Esayan A.G. Mekhanika polzuchesti betona. – M.: MGSU, 2013.
4. Tamrazyan A.G. K teorii rascheta po predel'nym sostoyaniyam na osnove reologicheskoy mekhaniki zhelezobetona // Beton i zhelezobeton. – 1999, №3. S.15...18.
5. Tamrazyan A.G. Beton i zhelezobeton: problemy i perspektivy // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2014, № 7. S. 51...54.
6. Tamrazyan A.G., Filimonova E.A. O vliyani snizheniya zhestkosti zhelezobetonnyh plit perekrytij na nesushchuyu sposobnost' pri dlitel'nom dejstvii nagruzki // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2012, № 7. S. 30...32.

7. Krylov S.B., Arleninov P.D. Metod linearizacii pri komp'yuternom modelirovanii yavleniya polzuchesti betona i zhelezobetona // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – V. 6. №1-2, 2010. P.144...145.

8. Sanzharovskij R.S. Problemy teorii polzuchesti // Stroitel'naya mekhanika inzhenernyh konstrukcij i sooruzhenij. – 2013, №3. S.28...34.

9. Ulickij I.I., CHzhan-CHzhun-YAo, Golyshev A.B. Raschet zhelezobetonnyh konstrukcij s uchetom dlitel'nyh processov. – Kiev: Gosstrojizdat USSR, 1960.

Рекомендована кафедрой железобетонных и каменных конструкций НИУ МГСУ. Поступила 21.12.17.
