

УДК 539.376

ИССЛЕДОВАНИЕ АНИЗОТРОПИИ ПОЛЗУЧЕСТИ БЕТОНА ПРИ
МАЛОЦИКЛОВОЙ СЖИМАЮЩЕЙ НАГРУЗКЕ

КОТИКЯН Р. А.

В данной работе приводятся результаты исследований нелинейной ползучести бетона при малоцикловом нагружении в зависимости от возраста бетона к моменту загрузки и направления сжимающей нагрузки по отношению к слоям бетонирования, то есть в двух взаимноперпендикулярных направлениях. Опыты проводились на призматических образцах сечением 7×7 см, высотой 28 см, изготовленных из вибрированного тяжелого бетона на базальтовом щебне, кварцевом песке и портланд-цементе активностью 50 МПа. Состав бетона 1:3,68:5,21. Всего было приготовлено четыре замеса бетона и из каждого изготовлено 90 призм, из коих: 42 бетонировались в вертикальных формах для испытаний перпендикулярно слоям бетонирования, а остальные — в горизонтальных формах для испытаний параллельно слоям бетонирования. Для краткости дальнейшего изложения первые условия обозначим образцами ПЭС, а вторые — образцами ПАС. В процессе длительных опытов в помещении лаборатории температура воздуха $T = 22 \pm 1^\circ \text{C}$, а относительная влажность — $P = 72 \pm 10\%$.

Для исследования ползучести бетона при постоянных и малоцикловых нагрузках образцы ПЭС и ПАС были загружены в возрасте (t) 7,28 и 226 сут., причем, в каждом возрасте — тремя разными уровнями нагружения: —0,25; 0,50 и 0,75. Назначение режимов нагружения образцов исходило из существующих исследований линейной и нелинейной ползучести бетона. Как известно, при нагружении бетона в молодом возрасте высокими напряжениями интенсивный рост прочности бетона во времени приводит к тому, что нелинейная ползучесть носит скоропроходящий характер, а при нагружении бетона в старом возрасте степень нелинейности ползучести во времени увеличивается. Именно по этой причине для молодого бетона принят более непродолжительный интервал времени цикла. Сравнительно непродолжительные циклы были приняты и для уменьшения продолжительности опытов. При исследовании ползучести бетона при малоцикловом нагружении в каждом возрасте одинаковым уровнем напряжения загружались по 10—12 образцов ПЭС и ПАС, большая часть которых в разное время подвергалась кратковременным испытаниям. Образцы по 2 шт. из каждой разновидности испытывались после разгрузок циклических нагрузок и «отдыхов», так что в итоге после отдыхов вторых циклов длительному

загружению подвергались 2—4 образца. Эти испытания необходимы были для оценки влияния циклических нагрузок и «отдыхов» на упруго-мгновенные деформации при нагружении и разгрузке, на модуль деформации и правильность оценки деформаций ползучести. Статистическая обработка экспериментальных данных показала, что показатель точности эксперимента в большинстве случаев не превышает 7%, при коэффициенте вариации $v=8,5\%$.

Таблица 1

Ползучесть бетона при постоянных и циклических сжимающих нагрузках

t (сут.)	τ (сут.)	Деформации ползучести образцов $\epsilon_p \times 10^3$, нагруженных нагрузками: постоянными (числитель), циклическими (знаменатель)						Коэффициент анизотропии по ползучести при нагрузках: постоянными (числитель), циклическими (знаменатель) σ/R_{np}			Отношение деформаций ползучести образцов, нагруженных постоянными нагрузками к деформациям ползучести образцов, нагруженных циклическими нагрузками					
		образцов ПЭС при σR_{np}			образцов ПАС при σR_{np}						образцов ПЭС при σR_{np}			образцов ПАС при σR_{np}		
		0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75
60	7	7,0	11,0	19,3	6,0	11,2	18,0	1,11	1,04	1,07	1,40	1,23	1,18	1,54	1,24	1,35
		5,0	9,4	16,3	3,9	9,0	13,3	1,28	1,04	1,23						
		3,7	6,8	16,0	3,2	6,4	12,0	1,16	1,06	1,33						
	28	3,0	5,8	13,4	3,1	6,3	12,7	0,97	0,92	1,00	1,23	1,17	1,19	1,03	1,02	0,94
		0,80	3,2	6,2	1,0	1,8	1,6	0,80	1,72	1,35						
		0,60	3,3	7,5	0,8	1,4	5,7	0,75	2,36	1,31						
300	7	8,0	14,0	22,5	7,5	13,2	20,4	1,07	1,06	1,10	1,21	1,17	1,11	1,41	1,14	1,27
		6,6	12,0	20,2	5,3	11,6	16,0	1,24	1,03	1,26						
		5,2	9,6	20,8	5,0	8,8	16,0	1,04	1,09	1,30						
	28	4,9	7,5	17,8	4,6	9,8	17,2	1,09	0,77	1,03	1,06	1,28	1,17	1,08	0,90	0,93
		1,7	4,8	8,5	1,6	3,5	6,6	1,06	1,37	1,29						
		1,4	4,8	10,2	1,3	3,6	8,8	1,08	1,33	1,16						

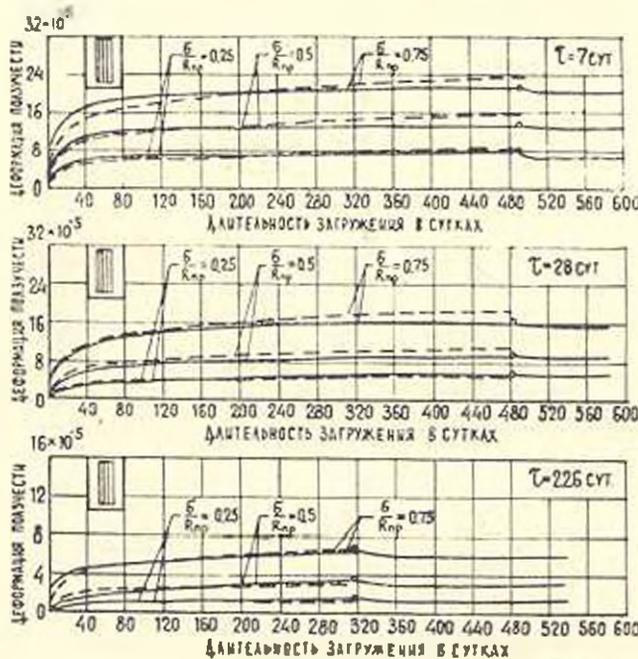
Для анализа, как качественно и количественно влияет циклическая нагрузка на ползучесть бетона и степень его анизотропии по ползучести, обратимся к табл. 1, где приведены экспериментальные значения деформаций ползучести при длительностях нагружения 60 и 300 сут. Как видим, отношение ползучести образцов, нагруженных постоянными нагрузками к ползучести образцов, нагруженных циклическими нагрузками, в большинстве случаев больше единицы. Это соотношение не зависит от длительности нагружения, уменьшается и с увеличением t и при $t=60$ сут., $\tau=226$ сут.; соотношение $\sigma/R_{np} \geq 0,5$ становится меньше единицы, то есть в этом случае ползучесть образцов, нагруженных циклическими нагрузками, уже больше ползучести образцов, нагруженных постоянными нагрузками. При $t=300$ сут. это обстоятельство имеет место и при $\tau=28$ сут. $\sigma/R_{np} \geq 0,5$. Рассмотрим

теперь, как изменяется коэффициент анизотропии бетона по деформациям ползучести (K_p), который представляет отношение деформаций ползучести образцов ПЭС к деформациям ползучести образцов ПАС. Как видим, как при постоянных, так и циклических нагрузках ползучесть образцов ПЭС больше ползучести образцов ПАС.

Одной из целей настоящей работы являлось исследование применимости теории упруго-ползучего тела [1] к описанию ползучести бетона при переменных режимах загрузки и разгрузки с учетом нелинейности деформаций и анизотропии материала. Согласно этой теории мера ползучести стареющего бетона представляется в следующем виде:

$$C(t, \tau) = \varphi(\tau) f(t - \tau) \quad (1)$$

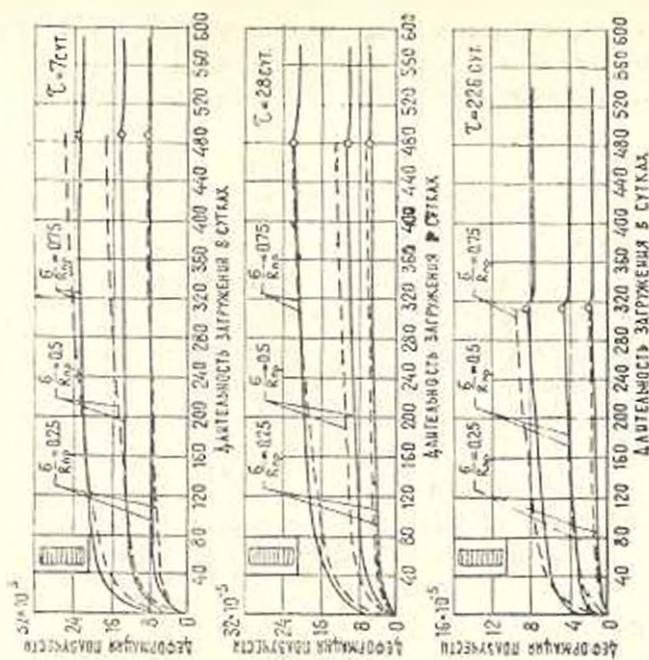
Формула (1) не учитывает анизотропию бетона, то есть бетон рассматривается как изотропный материал. Между тем, многочисленными исследованиями К. С. Карапетяна [2], К. С. Карапетяна и Р. А. Котикяна [3] и других установлено, что бетон в отношении прочности, модуля деформации и деформаций ползучести как при сжатии, так и при растяжении является существенно анизотропным материалом, а степень анизотропии зависит от различных факторов. Это ясно видно из данных табл. 1, а также фиг. 1 и 2, на которых сплошными линиями показаны экспериментальные кривые ползучести призм, испытанных перпендикулярно и параллельно слоям бетонирования постоянными



нагрузками. При описании этих кривых для меры ползучести была принята следующая зависимость:

$$C(t, \tau) = K^*(\tau) \cdot C'(t, \tau) \quad (2)$$

где $C(t, \tau)$ — мера ползучести образцов ПЭС, $C'(t, \tau)$ — мера ползучести образцов ПАС, а $K^*(\tau)$ — функция анизотропии ползучести.



Фиг. 2

Для описания меры ползучести образцов ПАС получена следующая зависимость:

$$C'(t, \tau) = \left(0,45 + \frac{132}{15 + \tau}\right) \left[1 - 0,5(e^{-0,1\tau} + e^{-0,001\tau})\right] \times 10^{-6} \quad (3)$$

Как уже было показано (табл. 1), отношение ползучести образцов ПЭС и ПАС существенно зависят от возраста бетона к моменту испытания τ . Учитывая это, фигурирующая в зависимости (2) функция анизотропии ползучести $K^*(\tau)$ в пределах данных опытов представляется в следующем виде:

$$K^*(\tau) = a + b\tau \quad (4)$$

где a и b — определяемые из опыта коэффициенты и их значения соответственно составляют 1,1 и 0,00168. Таким образом, на основании зависимостей (2), (3) и (4), для описания меры ползучести образцов ПЭС получена следующая зависимость:

$$C(t, \tau) = (1,1 + 0,00168\tau) \left(0,45 + \frac{132}{15 + \tau}\right) \left[1 - 0,5(e^{-\lambda_1\tau} + e^{-0,001\tau})\right] \times 10^{-6} \quad (5)$$

Как известно, согласно нелинейной теории ползучести [1]

$$\epsilon_0(t, \tau) = F[\sigma] = |C(t, \tau)| \quad (6)$$

где $F[\sigma]$ — некоторая функция напряжения, характеризующая нелинейную зависимость между напряжениями и деформациями ползучести. Согласно Н. Х. Арутюняну [1]

$$F[\sigma] = \alpha\sigma + \beta\sigma^n \quad (7)$$

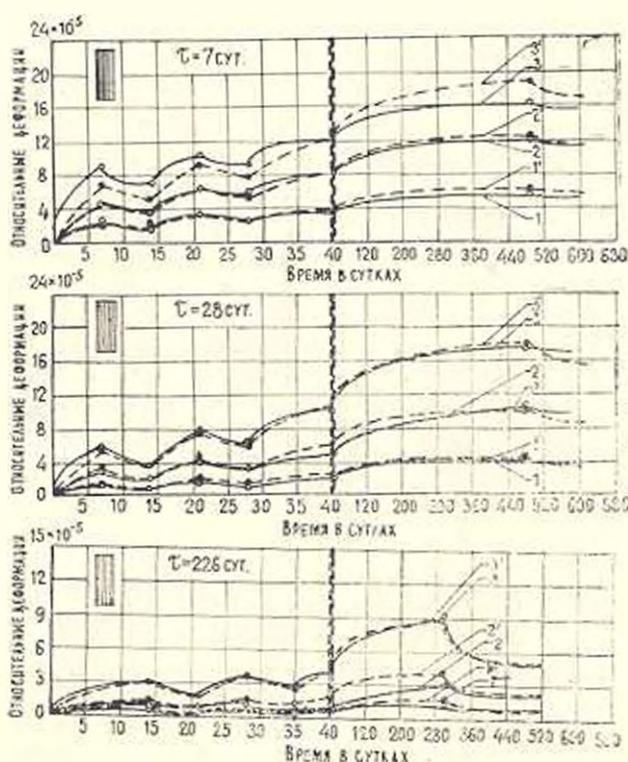
где α , β и n — определяемые из опыта коэффициенты.

Исследования показали, что при $\tau = 7$ сут. линейная зависимость между напряжениями и деформациями ползучести практически сохраняется до уровня напряжения 0,75; то есть $F[\sigma] = \alpha$.

Для $\tau = 28$ и 226 сут. получены следующие значения коэффициентов α , β и n :

$$\left. \begin{array}{l} \text{при } \tau = 28 \text{ сут.} \\ \alpha = 0,99999782 \\ \beta = 0,00000218 \\ n = 4 \end{array} \right\} \quad (8)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{при } \tau = 226 \text{ сут.} \\ \alpha = 0,999986 \\ \beta = 0,000011 \\ n = 4 \end{array} \right\} \quad (9)$$

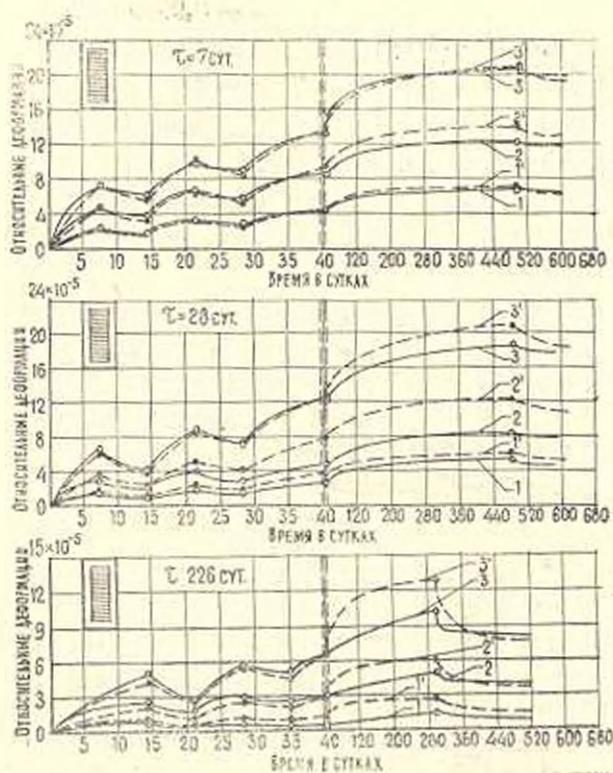


Фиг. 3

На фиг. 1 и 2 теоретические кривые деформаций ползучести образцов ПЭС и ПАС при постоянных напряжениях, показанные пунктирными линиями, рассчитаны зависимостями мер ползучести (3) и (5) и соответствующей каждому τ функцией напряжения. Как видим, сходимость экспериментальных и теоретических кривых весьма удовлетворительно. Обратимые деформации ползучести определены из зависимости [4]

$$\varepsilon_{\text{об}} = \varepsilon_{\text{н}}(t_1, \tau_1) - \varepsilon_{\text{н}}(t_1, \tau_2) \quad (10)$$

где $\varepsilon_{\text{н}}(t_1, \tau_1)$ — деформация ползучести в момент t_1 , вызванная напряжением $\varepsilon(\tau_1)$, приложенным в момент τ_1 и постоянное во времени. $\varepsilon_{\text{н}}(t_1, \tau_2)$ — деформация ползучести в момент t_1 , вызванная напряжением $\varepsilon(\tau_2)$, τ_2 — по величине и противоположным по знаку напряжению $\varepsilon(\tau_1)$, приложенному в момент τ_2 и постоянное во времени.



Фиг. 4

На фиг. 3 и 4 приведены экспериментальные и теоретические кривые ползучести бетона при малоцикловом нагружении. Теоретические кривые рассчитаны по формулам (3—6), а остаточные деформации ползучести определялись по формуле (10). Из этих фигур видно, что теория упругоползучего тела с уточнением (2) вполне удовлетворительно описывает экспериментальные кривые нелинейной ползучести стареющего бетона и при малоцикловой сжимающей нагрузке в двух взаимноперпендикулярных напряжениях.

Выводы

1. Малоцикловая сжимающая нагрузка приводит к уменьшению ползучести бетона, загруженного в молодом возрасте. С увеличением возраста бетона к моменту загрузки положительное влияние малоцикловой нагрузки уменьшается и уже при $\tau \geq 28$ сут. и $\sigma R_{cp} \geq 0,5$, независимо от направления сжимающей нагрузки по отношению к слоям бетонирования. Ползучесть образцов, загруженных малоцикловой нагрузкой, больше ползучести образцов, загруженных постоянной нагрузкой.

2. Независимо от τ , t и σR_{cp} , как при постоянных, так и при циклических сжимающих нагрузках, коэффициент анизотропии бетона по деформациям ползучести больше единицы, то есть ползучесть образцов, испытанных поперек слоев бетонирования, больше, чем ползучесть образцов, испытанных вдоль слоев бетонирования.

3. Теория упруго-ползучего тела с уточнением (2) вполне применима для описания экспериментальных кривых нелинейной ползучести стареющего бетона при малоцикловом нагружении в двух взаимноперпендикулярных направлениях.

THE INVESTIGATION OF ANISOTROPY OF CONCRETE CREEP UNDER SMALL CYCLIC COMPRESSIVE LOAD

R. A. KOTIKIAN

ՔԵՏՈՆԻ ՍՈՂՔԻ ԱՆԻՉՈՏՐՈՊԻԱՅԻ ՇԷՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆԸ
ՍԱԿԱՎԱՅԻԿԱՅԻՆ, ՍԵՂՄՈՂ ԼԱՐՈՒՄԸՆԵՐԻ ԴԵՊՐԵՍԻՄ

Ռ. Ա. ԿՈՏԻԿԻԱՆ

Ա մ փ օ փ օ ւ մ

Աշխատանքում բերվում են բետոնի ու գծային սողքի հետազոտության արդյունքները՝ կախված բետոնի հասակից և անիզոտրոպիայից:

Շետազոտությունները ցույց են տվել, որ սակավացիկային սեղմող լարումները բերում են երիտասարդ հասակի բետոնի դեֆորմացիաների մոդուլի մեծացման և սողքի դեֆորմացիաների փոքրացման, ինտոնի առաձգականության դեֆորմացիաների մոդուլը սակավացիկային սեղմող բնոսով բեռնավորման դեպքում մեծ է, քան բեռնաթափման դեպքում: Առաձգասողքային մարմնի սողքի տեսությունը բնորոշելի է ձերացող բետոնի ոչ գծային սողքի դեֆորմացիաների դրանցման համար, սակավացիկային բեռնավորման դեպքում, անիզոտրոպիայի աչվառումով:

ЛИТЕРАТУРА

1. *Арутюнян И. Х.* Некоторые вопросы теории ползучести бетона. М.: Гостехиздат, 1952. 323 с.
2. *Карапетян К. С.* Влияние анизотропии на деформации ползучести бетона.—Иль. АН АрмССР, сер. физ.-мат. наук, 1957. т. 10, № 6, с. 71—90.
3. *Карапетян К. С., Котикян Р. А.* Влияние масштабного фактора на ползучесть бетона.—В кн: Проблемы ползучести и усадки бетона. Второе Всесоюзное совещание (Ереван, 1974). Материалы совещания, подготовленные к печати НИИЖБ Госстроя СССР, М., Стройиздат, 1974. с. 5—12.
4. *Улицкий И. И.* Теория и расчет железобетонных стержневых конструкций с учетом длительных процессов. Киев: Изд. «Будикнильшк», 1967, 347 с.

Всесоюзный проектно-экспериментальный
конструкторский и технологический
институт

Поступила в редакцию
23.III. 1988