

УДК 531.539.376

**ПОЛЗУЧЕСТЬ ВЕСЬМА СТАРОГО БЕТОНА ПРИ
ПОСТОЯННЫХ И СТУПЕНЧАТО-ВОЗРАСТАЮЩИХ
НАГРУЗКАХ.**

Карапетян К.А.

Կ.Ա. Կարապետյան

Ծեր բետոնի սողը հաստատուն և աստիճանական աճող բեռների դեպքում

Աշխատանքում բերվում են 18 տարեկան հասակ ունեցող լիթոիդային պեմզաբետոնի սողի հետազոտման արդյունքները հաստատուն և ժամանակի ընթացքում աստիճանաձև աճող լարումների դեպքում: Ռիսունախրված է նաև հետադարձ սողը:

Ցույց է տրված, որ ծեր բետոնի սողի պրոցեսը նկարագրելու համար նպատակահարմար է օգտագործել ժառանգականության տեսությունը:

K.A. Karapetyan

The creep of aging concret under steady and growing loads

В работе приводятся результаты по исследованию ползучести литоидпемзо-бетона в возрасте 18 лет при постоянных и ступенчато-возрастающих во времени напряжениях, а также обратной ползучести.

Показано, что для описания процесса ползучести старого бетона целесообразно применять теорию наследственности.

Экспериментальные исследования реологических свойств старых бетонов, у которых физико-химические процессы, связанные с образованием цементного камня, можно считать полностью завершенными, немногочисленны [1-3 и др.]. Между тем, эти исследования важны для оценки напряженно-деформационного состояния эксплуатируемых конструкций.

Изучению ползучести бетонов при постоянных и переменных во времени нагрузках, описанию кривых ползучести, а также определению зависимости напряжения-деформации ползучести посвящено много работ. Сопоставление же экспериментальных кривых ползучести при переменном напряжении с кривыми, построенными по уравнениям той или иной теории ползучести на основании данных о ползучести при постоянных напряжениях, немногочисленны. Однако, указанное сопоставление необходимо для проверки применимости теорий ползучести при описании процесса ползучести материала [4,5].

Известно, что допущение о линейной зависимости между напряжениями и деформациями ползучести, положенное в основу линейных теорий ползучести бетона [6;7], справедливо лишь до некоторого уровня напряжений [8-10]. Исходя из того, что указанный уровень напряжений в большой мере зависит от возраста бетона к моменту нагружения [9,10], представляется целесообразным изучение этого вопроса для весьма старого бетона.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментальных исследований ползучести легкого бетона в возрасте 18 лет при постоянных и ступенчато-возрастающих во времени напряжениях, а также обратной ползучести. Анализируется вопрос о применимости теорий старения, упрочнения и наследственности для описания процесса ползучести бетона.

Исследования проводились на вибрированном легком бетоне состава в массе 1:1,43:2,50, В/Ц=0,86, Ц=294 кг/м³. Для приготовления бетона применялись песок ($\gamma_{п} = 1117$ кг/м³), щебень ($\gamma_{щ} = 834$ кг/м³) с фракцией 5-20 мм из литондой пемзы, взятой из карьера Джрабер (Республика Армения) и портландцемент из Араратского цементно-шиферного завода, активностью 50 МПа. Кратковременным и длительным испытаниям подвергались цилиндрические образцы диаметром 5,5 см, высотой 22 см, выбуренные из наружного слоя (глубиной 8-10 см от боковой поверхности) большого цилиндра в возрасте 5,5 лет. Сведения об изготовлении и хранении больших цилиндров с диаметром 57 см и высотой 25 см, до выбурения из них опытных образцов, приведены в работе [11]. Следует отметить, что после выбурения малые цилиндры в течение 12,5 лет находились в лабораторном помещении при средней температуре $20 \pm 6^\circ\text{C}$ и относительной влажности $79 \pm 5\%$, где в дальнейшем проводились эксперименты на ползучесть.

Кратковременные испытания опытных образцов и обработка полученных результатов проводились согласно методике, изложенной в работе [12]. Длительные испытания образцов на сжатие, как при постоянных, так и при ступенчато-возрастающих напряжениях, проводились на пружинных силовых установках, сконструированных и изготовленных в Институте механики. Ступенчатое повышение нагрузки производилось через каждые 14 суток. Спусти 128 сут., все образцы были разгружены и в течение 200 сут. велись наблюдения за деформациями обратной ползучести. Повторность опытов в каждом случае была принята трехкратной.

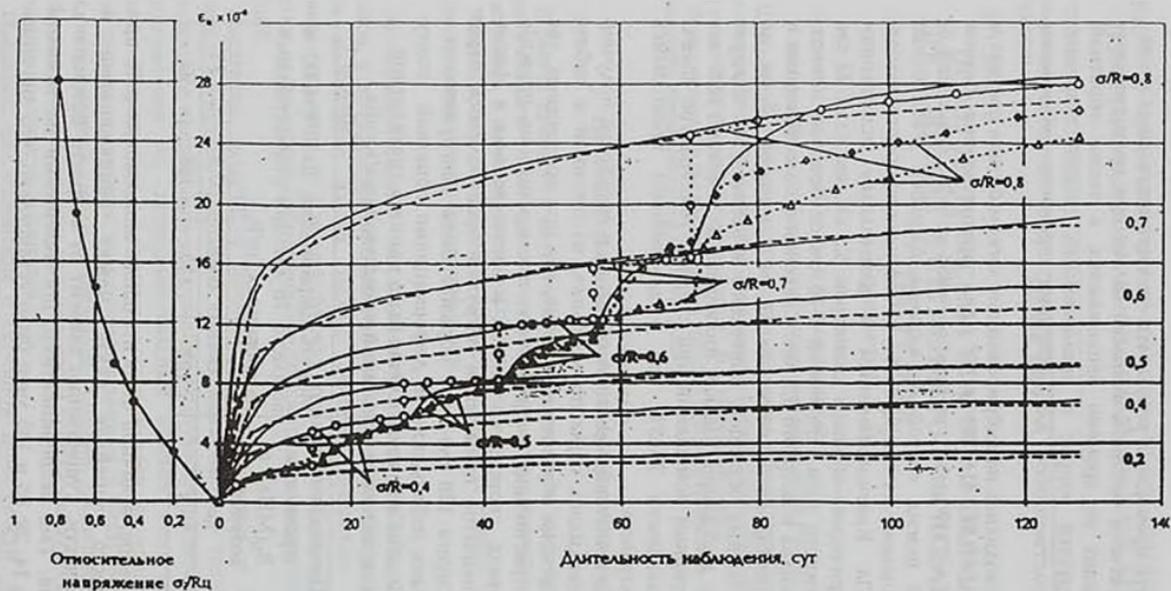
Результаты кратковременных испытаний представлены в табл. 1.

Таблица 1

Кубическая прочность в месячном возрасте R_k (МПа)	Цилиндрическая прочность R_c (МПа) в возрасте 18 лет	Модуль деформации $E \times 10^{-2}$ (МПа) в возрасте 18 лет при относительных напряжениях (σ/R_c)			
		0	0,25	0,5	0,75
25,9	19,3	122	112	102	92

Как отмечалось выше, величина относительного напряжения σ/R , при котором имеет место линейная связь между напряжениями и деформациями ползучести, существенно зависит от возраста бетона τ к моменту нагружения. Так, экспериментами, поставленными на тяжелом бетоне в возрасте 7; 14; 29; 95 и 185 дней было установлено, что значение указанной величины σ/R для $\tau \leq 7$ дней составляет 0,75, а в остальных случаях - 0,6 [10].

На основании результатов прямых экспериментальных исследований, представленных в левой части фиг. 1 настоящей работы, можно заключить, что значение относительного напряжения σ/R , при котором имеет место линейная связь между напряжениями и деформациями ползучести, в случае старых бетонов следует принять равным 0,45-0,5.



Фиг. 1 Экспериментальные и теоретические кривые ползучести и кривая $\epsilon_c = f(\sigma/R)$:

— - экспериментальные кривые, ---- - теоретические кривые, построенные согласно аппроксимации (2);
 -o- - старения, -Δ- - упрочнения, -□- - наследственности.

Известно, что для аппроксимации экспериментальных кривых $\epsilon_n - \sigma$, начальные участки которых близки к линейной зависимости, часто применяют функцию вида

$$\epsilon_n = \alpha\sigma + \beta\sigma^n \quad (1)$$

где α , β , n - опытные параметры.

Для аппроксимации экспериментальных данных, представленных в левой части фиг.1 настоящей работы в зависимости (1) вместо абсолютного значения напряжения σ , использовалось его относительное значение $\sigma/R_{ц}$. Это целесообразно для устранения противоречий, существующих в размерностях опытных параметров α и β .

В правой части фиг.1 сплошными линиями представлены экспериментальные кривые ползучести, полученные при различных значениях постоянного напряжения σ_1 , в сравнении с построенными кривыми, согласно аппроксимации

$$\epsilon(t) = \left[\alpha \frac{\sigma_1}{R_{ц}} + \beta \left(\frac{\sigma_1}{R_{ц}} \right)^n \right] \left[1 - 0,5(e^{-\gamma_1 t} + e^{-\gamma_2 t}) \right] \quad (2)$$

показанными штриховыми линиями. Опытные параметры аппроксимации (2) приняты следующими: $\alpha = 15,72$, $\beta = 42,42$, $n = 4,54$, $\gamma_1 = 0,42$ 1/сут., $\gamma_2 = 0,02$ 1/сут.

Как можно заключить из фиг.1, аппроксимация (2) вполне приемлема для описания деформации ползучести старого бетона.

В правой части фиг.1 сплошными линиями показаны экспериментальные кривые ползучести, полученные при ступенчато-возрастающих во времени напряжениях. Представлены также кривые ползучести, построенные согласно теориям старения, упрочнения и наследственности на основании кривых, полученных при постоянных напряжениях

Сопоставление экспериментальных кривых ползучести при ступенчато-возрастающих напряжениях с кривыми, построенными по указанным выше теориям, показывает, что кривые теории старения всегда располагаются выше экспериментальных кривых (фиг.1). Кривые теории упрочнения и наследственности вплоть до уровня относительного напряжения $\sigma/R_{ц} = 0,6$ практически одинаково удовлетворительно описывают результаты экспериментов. При $\sigma/R_{ц} > 0,6$ кривая теории упрочнения проходит ниже экспериментальной кривой, а кривая теории наследственности занимает промежуточное положение.

Из фиг.1 очевидно, что в целом, для описания процесса ползучести старого бетона, целесообразно применять теорию наследственности [7].

Экспериментальные сведения об обратимых деформациях, имевших место при частичной или полной разгрузке бетона, необходимы для правильной оценки реального состояния конструкций. При разгрузке бетона, нагруженного в раннем возрасте, упруго-деформированный заполнитель, мгновенно восстанавливаясь, стремится в дальнейшем полностью приобрести свою первоначальную форму [4;8;12 и др.]. Этому препятствует затвердевший во времени цементный камень, испытывающий в местах контакта с заполнителем растягивающие напряжения, которые и являются причиной обратимости деформаций. Очевидно, что в случае бетона, нагруженного в старом возрасте, т.е. когда образование цементного камня можно считать законченным, обратимость деформаций после разгрузки может быть существенной.

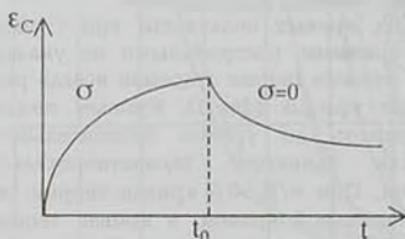
Из табл.2, где приведены данные о мгновенных деформациях, можно заключить, что величины указанных характеристик, полученных при нагружении опытных образцов постоянной нагрузкой, вплоть до значения $\sigma/R_u=0,6$ и при их разгрузке через 128 сут. практически не отличаются друг от друга. При $\sigma/R_u > 0,6$ величины мгновенных деформаций, полученные при разгрузке образцов, оказались несколько меньшими, чем при их нагружении. В случае же образцов, нагруженных ступенчато-возрастающими напряжениями вплоть до $\sigma/R_u=0,8$, имеет место обратное явление.

Таблица 2

Вид действующего усилия	Величины мгновенных деформаций ($\epsilon_{мгн} \times 10^{-3}$)						
	при постоянных значениях σ/R						
	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	
Нагружение	29,1	59,8	73,9	90,1	116,5	140,4	
Разгрузка	29,0	56,8	70,2	87,9	105,9	129,1	
	при ступенчато-возрастающих значениях σ/R						
	0,2	0,2-0,4	0,4-0,5	0,5-0,6	0,6-0,7	0,7-0,8	Итого
Нагружение	27,9	25,8	15,0	15,0	15,0	11,5	110,2
Разгрузка	-	-	-	-	-	-	119,5

Прогнозирование обратимых деформаций ползучести после полного снятия напряжения в сравнении с экспериментальными данными позволяет оптимально выбрать соответствующую теорию для описания процесса ползучести бетона.

Обратная ползучесть характеризуется деформированием материала во времени в направлении, противоположном действующему напряжению σ_0 , после его снятия в момент времени t_0 (фиг. 2).



Фиг. 2

Условие наличия обратной ползучести для программы изменения напряжения

$$\sigma(t) = \begin{cases} \sigma_0 & 0 < t < t_0 \\ 0 & \text{при } t > t_0 \end{cases} \quad (3)$$

имеет следующее математическое представление [13]:

$$\epsilon_c(\sigma(t), t) - \epsilon_c(\sigma_0, t_0) < 0, \quad t > t_0 \quad (4)$$

Согласно наследственной теории ползучести для выше-

упомянутой программы (3) имеет место

$$\epsilon_c(0, t) - \epsilon_c(\sigma_0, t_0) = F(\sigma_0, t) - F(\sigma_0, t - t_0) - F(\sigma_0, t_0) < 0 \quad (5)$$

что предопределяет обратную ползучесть, поскольку условие (4) соблюдается [13].

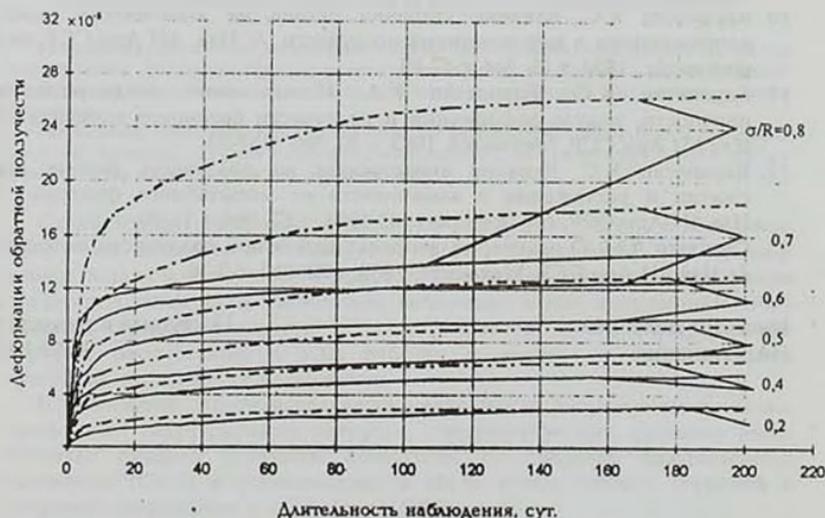
При использовании теории наследственности в применении к аппроксимации (2) будем иметь

$$\epsilon_c(t) = \int_0^t \left[\alpha \frac{\sigma(\tau)}{R_u} + \beta \left(\frac{\sigma(\tau)}{R_u} \right)^n \right] 0,5 [\gamma_1 e^{-\gamma_1(t-\tau)} + \gamma_2 e^{-\gamma_2(t-\tau)}] d\tau \quad (6)$$

Легко видеть, что при $t \leq t_0$ выражение (6) совпадает с выражением (2), а при $t > t_0$ из выражения (6), после некоторых выкладок, получаем следующую формулу для обратной ползучести, согласно наследственной теории:

$$\varepsilon_{\text{оп}}(t > t_0) = \left[\alpha \frac{\sigma_i}{R_{\text{ц}}} + \beta \left(\frac{\sigma_i}{R_{\text{ц}}} \right)^n \right] \times \left[1 - 0,5(e^{-\gamma_1 t_0} + e^{-\gamma_2 t_0}) - 0,5(e^{-\gamma_1(t-t_0)} - e^{-\gamma_1 t} + e^{-\gamma_2(t-t_0)} - e^{-\gamma_2 t}) \right] \quad (7)$$

На фиг.3 сплошными линиями представлены экспериментальные кривые обратной ползучести, а штриховыми линиями – аналогичные кривые, прогнозируемые теорией наследственности согласно аппроксимации (7). Отметим, что экспериментальные значения обратимых деформаций ползучести образцов, нагруженных постоянным относительным напряжением $\sigma/R_{\text{ц}}=0,8$ и образцов, нагруженных ступенчато-возрастающими напряжениями вплоть до $\sigma/R_{\text{ц}}=0,8$ практически не отличаются друг от друга и, поэтому на фиг.3 они представлены единой кривой. Из фиг.3 можно заключить, что теорию наследственности можно считать приемлемой для описания обратимых деформаций ползучести бетонов, нагруженных в старом возрасте вплоть до значения $\sigma/R_{\text{ц}}=0,5$.



Фиг. 3. Экспериментальные и теоретические кривые обратной ползучести, построенные согласно аппроксимации (7).

ЛИТЕРАТУРА

1. Troxell G.E., Raphael J.M., Davis R.E. Long-time creep and shrinkage tests of plane and reinforced concrete // Proc. Amer. Soc. Test. Mater. 1958 (1959), 58, p.1101-1120.
2. Карапетян К.С., Карапетян К.А. Исследование изменения прочности, модуля деформации и степени анизотропии весьма старого бетона при сжатии вследствие водонасыщения и высыхания. // Изв. АН Арм.ССР, Механика, 1981, т.34, №4, с.29-51.
3. Карапетян К.А. Влияние высыхания на ползучесть и анизотропию весьма старого бетона. –Сб.: Механика деформируемых тел и конструкций. Изд.АН Арм.ССР, 1984, с.197-202.
4. Васильев П.И. Некоторые вопросы пластических деформаций бетона. //Изв. ВНИИГ, 1953, т.49, с.83-113.
5. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. –М.: Наука, 1966. 752 с.
6. Малинин П.И. Основы расчетов на ползучесть. –М.: Машгиздат, 1948. 323 с.
7. Арутюнян Н.Х. Теория упругого напряженного состояния бетона с учетом ползучести. // ПММ, 1949, т.ХIII, №6, с.28-39.
8. Улицкий И.И. Ползучесть бетона. –Киев: Гостехиздат Украины, 1948. 495 с.
9. Васильев П.И. Связь между напряжениями и деформациями в бетоне при сжатии с учетом влияния времени. // Изв. ВНИИГ, 1951, т.45, с.78-92.
10. Карапетян К.С. Влияние старения бетона на зависимость между напряжениями и деформациями ползучести. // Изв. АН Арм.ССР, сер. физ.-мат.н., 1959, т.12, №4, с.57-88.
11. Карапетян К.С., Карапетян К.А. Исследование неоднородности прочности, модуля деформации и ползучести бетонного элемента. // Изв.АН Арм.ССР, Механика, 1983, т.36, №2, с.37-53.
12. Карапетян К.С. Влияние анизотропии на ползучесть бетона при сжатии и растяжении в зависимости от масштабного фактора. // Изв.АН Арм.ССР, сер. физ.-мат. н., 1964, т.17, №4, с.71-90.
13. Симонян А.М. О некоторых вопросах одноосной ползучести металлов. // Изв.АН Арм.ССР, Механика, 1980, т.33, №2, с.3-16.

Институт механики
НАН Армении

Поступила в редакцию
15.09.1998