

Э. А. МАНУКЯН

О НЕЛИНЕЙНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ БЕТОНА ПРИ ЦЕНТРАЛЬНОМ СЖАТИИ

Ряд обстоятельств (переход на расчет конструкций по предельным состояниям, широкое распространение предварительно напряженного бетона), при которых приходится иметь дело с очень высокими относительными напряжениями, потребовал большого внимания к нелинейной ползучести бетона.

Распространению теории Маслова—Арутюняна на нелинейную область посвящены работы П. И. Васильева, К. С. Карапетяна, М. М. Манукяна, А. А. Гвоздева, Н. И. Катина и др. На теории старения, существенно облегчающей решения уравнений ползучести, основаны работы И. И. Улицкого.

Разработка нелинейной теории ползучести в работах [1], [2], [11], [13] основывается на гипотезе аффинного подобия кривых ползучести при различных напряжениях. На нелинейную область распространяется также приближенно подтверждающийся в случае монотонно изменяющихся напряжений принцип наложения.

В соответствии с гипотезой аффинного подобия кривых ползучести и принципом наложения зависимость между напряжениями и деформациями ползучести в нелинейной области можно представить в случае отсутствия старения в следующем виде [5]:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E} + \int_0^t \frac{\partial}{\partial \sigma} F(t - \tau) \varphi[\sigma(\tau)] d\tau \quad (1)$$

где

$$\varphi(\tau) = \int_0^{\tau} \varphi'(\zeta) d\zeta$$

Это выражение соответствует нелинейной теории наследственной упругости и хорошо описывает деформирование бетона при возрастающих напряжениях.

Данная статья посвящена вопросу приемлемости гипотезы аффинного подобия кривых ползучести и принципа наложения, которые существенно облегчают определение величины деформации ползучести, а также возможности использовать зависимость (1) для описания ползучести стареющего бетона при высоких относительных напряжениях. В статье дан анализ работ Н. И. Катина, К. С. Карапетяна, а также

опытов, проведенных в лаборатории кафедры инженерных конструкций ЛПИ им. М. И. Калинина в 1965 г.

Испытанию подвергались 3 серии образцов в возрасте соответственно 1, 2 и 3 месяца. В каждой серии один образец испытывался на ступенчатую нагрузку, остальные — на постоянную нагрузку. Измерялись также деформации от колебаний температуры незагруженного образца.

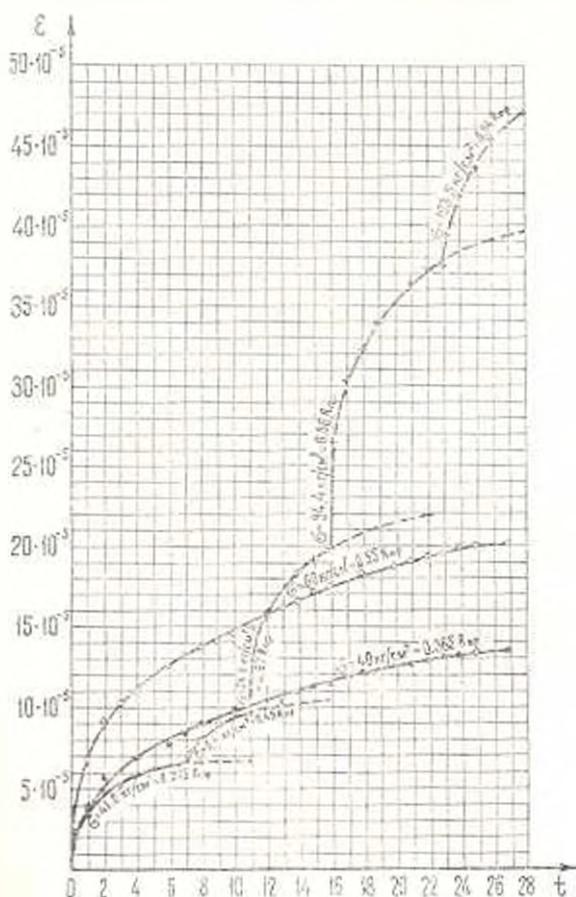
Образцы, размером $70 \times 70 \times 300$ мм, изготавливались в деревянной опалубке. Состав бетона: Ц : П : Ш = 1 : 3.33 : 4.84 по весу. Водоцементное отношение — 0.8. После бетонирования образцы выдерживались неделю в опалубке во влажных условиях, затем распалубливались и после непродолжительного хранения в обычных условиях для подсушивания поверхности покрывались паронизацией по всем граням. С этой целью применялась эпоксидная смола ЭД-6, гидро- и паронизирующие свойства которой хорошо известны [15]. В качестве отвердителя применялся полиэтиленполиамин. Надежность гидроизоляции показало также контрольное взвешивание кубика $70 \times 70 \times 70$ мм, покрытого эпоксидной смолой с отвердителем. Пленка из эпоксидной смолы не имела сцепления с поверхностью образцов и не препятствовала их свободному деформированию.

Испытания на ступенчатую нагрузку производились на рычажном прессе, на постоянную нагрузку — на пружинных прессах. Давление от рычагов и винтов на образцы передавалось через металлические плитки, между которыми, в лунках, находился шарик. Деформации измерялись рычажными тензометрами Гугенбергера, которые ставились по всем граням образца на бетонную поверхность, для чего в паронизации вырубались „окна“ размерами приблизительно 10×10 мм. Центрирование образцов производилось по показаниям тензометров путем приложения небольших пробных нагрузок. Температура в помещении колебалась от 14° до 24° . В первый день загрузки показания брались через 15 мин, 30 мин, 1, 2, 3, 6 часов, в дальнейшем — раз в сутки. По замеренным деформациям ползучести построены графики в координатах $t - \epsilon_t$ (фиг. 1, 2, 3)*. Вычислялось изменение нелинейности деформаций ползучести с увеличением напряжений при ступенчатом приложении нагрузки по соотношению $\frac{\Delta \epsilon_n}{\epsilon_n} = \frac{\epsilon_1}{\Delta \epsilon}$, где ϵ_1 и ϵ_n — соответ-

ственно величина первой ступени и соответствующая ей деформация ползучести, а $\Delta \epsilon_n$ и $\Delta \epsilon$ — соответствующие приращения — последующая ступень. Результаты сведены в табл. 1-а и 1-б. Для образцов, загруженных постоянной нагрузкой, вычислялось соотношение соответствующих деформаций ползучести (табл. 2).

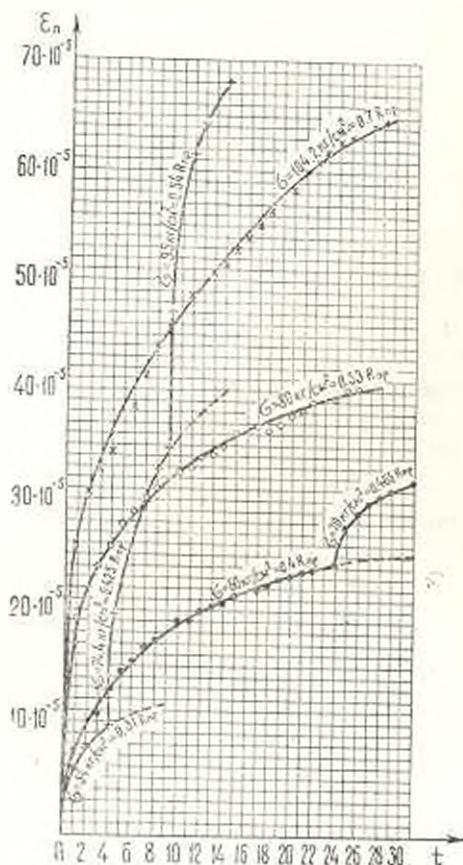
* Во II серии образец, загруженный ступенчатой нагрузкой, деформировался очень большой скоростью, к тому же величина деформации, начиная со II ступени, была несравненно больше, чем у других образцов; прочность и модуль образца также оказались больше. Поэтому данные этого образца в дальнейшем не использовались.

Из таблиц видно, что изменение нелинейности со временем связано с возрастом бетона в момент нагружения и с величиной относительного напряжения. У образцов, нагруженных в возрасте одного месяца, нелинейность уменьшается со временем вплоть до $\frac{\sigma}{R_{пр}} = 0,858$, причем особенно значительное уменьшение наблюдается в первые 2—3 дня, в дальнейшем процесс выравнивается и графически выражается прямой, почти параллельной оси t . При более высоких относительных напряжениях нелинейность со временем значительно увеличивается. У

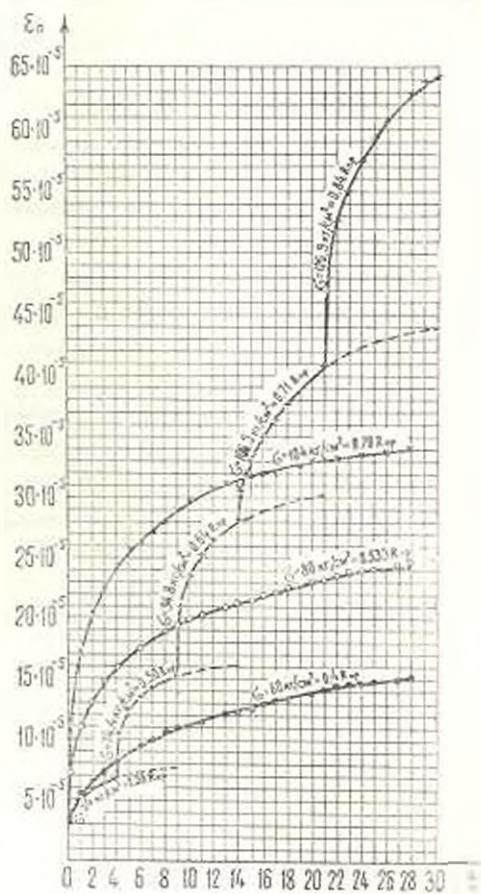


Фиг. 1. Кривые ползучести 1 серии (возраст — 1 месяц).

образцов, нагруженных в более зрелом возрасте (2 и 3 месяца) сравнительно небольшой относительной нагрузкой ($0,5 R_{пр}$ и $0,533 R_{пр}$) нелинейность практически не изменяется, хотя и имеет тенденцию к уменьшению. Это продолжается вплоть до $0,7 - 0,75 R_{пр}$, после чего с течением времени нелинейность увеличивается. Таким образом, можно сделать вывод, что нелинейность деформаций ползучести меняется с увеличением относительного напряжения и может либо уменьшаться, либо увеличиваться, а при какой-то величине относительного напря-



Фиг. 2. Кривые ползучести II серии (возраст — 2 месяца).



Фиг. 3. Кривые ползучести III серии (возраст — 3 месяца).

Изменение нелинейности деформаций ползучести с увеличением напряжений при ступенчатом нагружении

I серия		Таблица 1а			
Время в сут-ках	σ	σ = 0,375 R _{0p}		σ = 0,49 R _{0p}	
		ε	R _{0p}	ε	R _{0p}
1	1	1.32	3.15	5.86	4.7
2	1	1.385	3.02	5.06	5.1
3	1	1.57	3.11	5.19	5.85
4	1	1.55	2.97	5.00	6.0
5	—	—	2.97	5.00	6.3
6	—	—	—	5.00	—
7	—	—	—	4.47	—

II серия		Таблица 1б			
Время в сут-ках	σ	σ = 0,36 R _{0p}		σ = 0,50 R _{0p}	
		ε	R _{0p}	ε	R _{0p}
1	1	2.92	4.50	4.30	6.23
2	1	2.91	4.60	4.95	6.36
3	1	2.93	4.62	5.42	6.51
4	1	2.83	4.47	5.58	6.46
5	1	2.84	4.42	6.00	6.60
6	—	—	—	6.25	6.74
7	—	—	—	6.54	6.90

Изменение соотношения деформации ползучести во времени

Таблица 2

		$t - \tau$								
		1	2	3	4	5	10	15	20	28
Серия I	$\frac{\varepsilon_{лз}}{\varepsilon_{лс}} (\sigma = 0.55 R_{пр})$	1.78	1.66	1.74	1.64	1.59	1.51	1.53	1.50	1.50
	$\frac{\varepsilon_{лз}}{\varepsilon_{лс}} (\sigma = 0.365 R_{пр})$									
Серия II	$\frac{\varepsilon_{лз}}{\varepsilon_{лс}} (\sigma = 0.53 R_{пр})$	2.52	2.32	2.20	2.02	1.94	1.72	1.68	1.63	
	$\frac{\varepsilon_{лз}}{\varepsilon_{лс}} (\sigma = 0.4 R_{пр})$									
Серия III	$\frac{\varepsilon_{лз}}{\varepsilon_{лс}} (\sigma = 0.7 R_{пр})$	3.38	3.33	3.11	2.87	2.77	2.50	2.50	2.50	
	$\frac{\varepsilon_{лз}}{\varepsilon_{лс}} (\sigma = 0.4 R_{пр})$									
Серия III	$\frac{\varepsilon_{лз}}{\varepsilon_{лс}} (\sigma = 0.533 R_{пр})$	2.10	2.09	2.05	1.95	1.91	1.80	1.72	1.67	1.63
	$\frac{\varepsilon_{лз}}{\varepsilon_{лс}} (\sigma = 0.4 R_{пр})$									
	$\frac{\varepsilon_{лз}}{\varepsilon_{лс}} (\sigma = 0.7 R_{пр})$	2.22	2.36	2.17	2.98	2.92	2.59	2.57	2.41	2.27
	$\frac{\varepsilon_{лз}}{\varepsilon_{лс}} (\sigma = 0.4 R_{пр})$									

жения она остается постоянной. Эта величина зависит от возраста бетона и момент загрузки. Разумеется, на это явление оказывает влияние и другие факторы (состав бетона, вид цемента и заполнителей, температурно-влажностные условия и т. п.), но их влияние не изучалось.

На основании экспериментов, проведенных в НИИЖБ, Н. И. Катин пришел к выводу, что аффинного подобия кривых ползучести при высоких сжимающих напряжениях не существует [8]. В его опытах образцы в возрасте 28, 50 и 140 дней с паровоздухонепроницаемыми поверхностями подвергались действию постоянных напряжений в довольно обширном диапазоне — от $0.3 R_{пр}$ до $0.9 R_{пр}$ ($R_{пр}$ — прочность бетона к моменту загрузки) и выдерживались под нагрузкой 140 дней.

Степень нелинейности характеризовалась величиной $\frac{\varepsilon_{лз}}{\varepsilon_{лс}} = \frac{\varepsilon_{лз}}{0.3 R_{пр}}$, которая с течением времени убывала. Особенно интенсивное убывание происходило в первые 10–20 дней и особенно у образцов, загруженных в возрасте 28 и 50 дней, гораздо меньше — у образцов, загруженных в возрасте 140 дней. Основываясь на этом, Н. И. Катин считает, что при высоких относительных напряжениях кривые перестают быть подобными. Однако, если в его опытах брать за исходную кривую, соответствующую относительным напряжениям 0.61 (во II серии) или 0.75 (в III серии) вместо 0.3, графики соотношений $\frac{\varepsilon_{лз}}{\varepsilon_{лс}} = \frac{\varepsilon_{лз}}{0.61 R_{пр}}$ и $\frac{\varepsilon_{лз}}{\varepsilon_{лс}} = \frac{\varepsilon_{лз}}{0.75 R_{пр}}$ примет вид, близкий к прямым линиям (табл. 3а и 3б).

Таблица 3а
Изменение во времени отношения удельных деформаций
получести бетона к удельным деформациям при
 $\tau = 0.61 R_{np}$ (по опытам Н. И. Катина, II серия).
 $\tau = 142$ дни

$t - \tau$	5	10	20	40	60
$\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_a} \tau = 0.91 R_{np}$	2.33	2.24	2.38	2.25	2.28
$\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_a} \tau = 0.61 R_{np}$	2.00	1.87	1.95	1.86	1.92
$\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_a} \tau = 0.61 R_{np}$	1	1	1	1	1
$\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_a} \tau = 0.61 R_{np}$	0.42	0.49	0.50	0.55	0.62

Таблица 3б
Изменение во времени отношения удельных деформаций
получести бетона к удельным деформациям при
 $\tau = 0.75 R_{np}$ (по опытам Н. И. Катина, III серия).
 $\tau = 50$ дней

$t - \tau$	2.5	5	30	50
$\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_a} \tau = 0.92 R_{np}$	2.66	2.43	2.03	1.98
$\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_a} \tau = 0.75 R_{np}$	1	1	1	1
$\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_a} \tau = 0.75 R_{np}$	0.40	0.48	0.52	0.54
$\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_a} \tau = 0.3 R_{np}$	0.34	0.40	0.47	0.50

Та же картина наблюдается при обработке опытов К. С. Карапетяна. Сравнивались отношения $\frac{\varepsilon_n(\tau/R_n)}{\varepsilon_a(\tau/R_n - 0.75)}$ для образцов из старого бетона. Результаты сведены в табл. 4, из которой видно, что и в опытах К. С. Карапетяна нарушение подобия кривых ползучести и снижение нелинейности с увеличением длительности нагрузки невелико.

Таблица 4

Изменение во времени отношения деформаций ползучести бетона к деформациям при $\sigma = 0.75 R_u$ (по опытам К. С. Карапетяна)
 $\tau = 185$ дней $\tau = 95$ дней

$t - \tau$	4	20	60	120	4	20	40	60
$\varepsilon_n (\sigma = 0.95 R_u)$								
$\varepsilon_n (\sigma = 0.75 R_u)$	1.88	1.65	1.65	1.72	—	—	—	—
$\varepsilon_n (\sigma = 0.90 R_u)$								
$\varepsilon_n (\sigma = 0.75 R_u)$	1.5	1.35	1.55	1.33	1.48	1.48	1.50	1.37
$\varepsilon_n (\sigma = 0.75 R_u)$								
$\varepsilon_n (\sigma = 0.75 R_u)$	1	1	1	1	1	1	1	1
$\varepsilon_n (\sigma = 0.50 R_u)$								
$\varepsilon_n (\sigma = 0.75 R_u)$	0.415	0.434	0.50	0.47	0.47	0.52	0.55	0.52

Таким образом, зависимость (1) можно применять в тех случаях, когда старение невелико, однако, для уменьшения погрешностей, которые получаются вследствие имеющего место отклонения от закона подобия, за график функции $F(t - \tau)$ надо брать кривую, подобную кривой ползучести при напряжениях $0.6 + 0.7 R_u$.

Если испытывать параллельно два одинаковых образца, один — при постоянных сжимающих напряжениях σ , другой — при ступенчатом нагружении с величиной ступени $\Delta\sigma$, причем $\sigma + \Delta\sigma = \sigma_0$, то можно убедиться в приемлемости принципа наложения, т. е. при отсутствии старения

$$\varepsilon_n(\sigma, t - \tau_0) = \varepsilon_n(\Delta\sigma, t - \tau_0), \quad \text{при } t - \tau_0 = t - \tau_0.$$

Как известно, для стареющего бетона взамен функции величины напряжения $\sigma(\tau)$ предложено использовать функцию величины относительных напряжений $\Phi\left(\frac{\sigma}{R_{sp}}\right)$ и записать, с учетом переменности модуля, зависимость между деформациями ползучести и напряжениями в таком виде [3]:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E(t)} - \int_{\tau_0}^t \sigma(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \left| \frac{1}{E(\tau)} \right| d\tau - \int_{\tau_0}^t \Phi \left| \frac{\sigma(\tau)}{R_{sp}(\tau)} \right| \frac{\partial}{\partial \tau} C(t, \tau) d\tau \quad (2)$$

Но, так как в этом выражении не учитывается изменение отношения $\frac{\sigma}{R_{sp}}$ с течением времени (в результате увеличения R_{sp}), было предложено учитывать влияние величины $\frac{\sigma}{R_{sp}}$ в выражении скорости роста деформаций ползучести при постоянных напряжениях [4], кото-

рая принимается в виде произведения двух функций — функции длительности нагружения $f'(\gamma - \tau)$ и функции возраста и величины относительного напряжения $\frac{\sigma(\tau)}{R(\tau)}$ в момент измерения скорости роста деформаций ползучести

$$\varepsilon_n(\tau) = \varphi \left| \frac{\sigma(\tau)}{R(\tau)} \cdot \gamma \right| f'(\gamma - \tau) \quad (3)$$

При постоянных напряжениях деформация ползучести определяется по формуле

$$\varepsilon(t, \tau_0) = \int_{\tau_0}^t \varphi \left| \frac{\sigma(\tau_0)}{R(\tau)} \cdot \gamma \right| f'(\gamma - \tau_0) d\tau \quad (4)$$

Можно распространить эту формулу на случай переменного во времени напряжения (придерживаясь принципа наложения)

$$\varepsilon_1(t) = \int_0^t \int_{\tau}^t \frac{d\sigma}{d\tau} [\tau, R, \gamma] f'(\gamma - \tau) d\tau d\tau \quad (5)$$

В тех случаях, когда старение закончилось или им можно пренебречь, выражение (4) принимает вид

$$\varepsilon_n(t, \tau_0) = \varphi \left| \frac{\sigma(\tau_0)}{R} \right| f(t - \tau_0) \quad (6)$$

Учитывая то обстоятельство, что кривые функций $\sigma(\tau)$ и изменения относительной прочности почти совпадают, влияние старения можно выразить через функцию относительной прочности [5]

$$\varepsilon_n(t, \tau_0) = \int_{\tau_0}^t \varphi \left| \frac{\sigma(\tau_0)}{R(\tau)} \right| f'(\gamma - \tau_0) d\tau, \quad (\sigma = \text{const}) \quad (7)$$

Возможность применения выражения (7) для описания ползучести стареющего бетона при высоких относительных напряжениях проверялась анализом результатов, полученных Н. И. Катиным в I серии своих экспериментов [8].

Из этого выражения следует, что приращение деформаций ползучести $\Delta\varepsilon_n$, образовавшееся за некоторый малый отрезок времени $\Delta\tau$, можно представить в виде

$$\Delta\varepsilon_n = \varepsilon_n(\tau + \Delta\tau) - \varepsilon_n(\tau) \approx \varphi \left[\frac{\sigma(\tau_0)}{R\left(\tau + \frac{\Delta\tau}{2}\right)} \right] f'\left(\gamma - \frac{\Delta\tau}{2} - \tau_0\right) \Delta\tau \quad (8)$$

Как это видно из (8), при равных длительностях приложения нагрузки $\tau_1 = \tau_0$ и одинаковых интервалах времени $\Delta\tau$, но разных от-

восительных напряжениях $R(t)$ приращение деформаций ползучести $\Delta \varepsilon_n$ за время Δt должно быть пропорционально величине функции φ . Согласно (7), увеличение длительности действия нагрузки не должно влиять на значения функции φ .

При анализе опытов Н. И. Катина рассматривались отношения приращений

$$\frac{\Delta \varepsilon_n(\sigma)}{\Delta \varepsilon_n(\sigma = 0.61 R_{np})} = \frac{\varphi\left(\frac{\sigma}{R_{np}}\right)}{\varphi\left(\frac{\sigma}{R_{np}} = 0.61\right)}$$

Как видно из табл. 3а, величина функции $\varphi\left(\frac{\sigma}{R_{np}}\right)$ с увеличением длительности действия напряжений убывает, если $\sigma > 0.61 R_{np}$ и возрастает, если $\sigma < 0.61 R_{np}$. Это явление объясняется влиянием длительности загрузки на степень нелинейности, обнаруженным Н. И. Катиним. Но изменение величины функции относительных напряжений с увеличением длительности загрузки сравнительно невелико (около 20%) и не противоречит возможности использования выражения (7).

Для определения возможности применения зависимости (4) обрабатывались результаты экспериментов К. С. Караветяна [9], [10].

В случае старого бетона, в котором старение закончилось, зависимость (4) переходит в выражение (6), причем для относительных напряжений $\frac{\sigma}{R_{np}} < 0.4$, где справедлива линейная зависимость, оно еще более упрощается и принимает вид

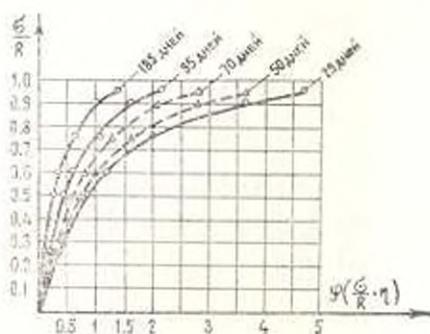
$$\varepsilon_n(t, \tau_0) = \frac{\sigma(t_0)}{K} f(t - \tau_0) \quad (6a)$$

Располагая экспериментальной кривой ползучести старого бетона при невысоких напряжениях, нетрудно построить график функции $f(t - \tau_0)$, разделив ординаты этой кривой на величину относительного напряжения. При обработке экспериментальных данных К. С. Караветяна график функции f был построен по кривой $\tau = 95$ дней, $\frac{\sigma}{R_0} = 0.5$ (фиг. 4).

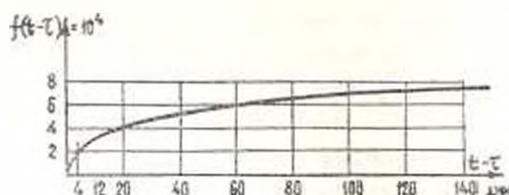
В соответствии с (6) значения функции $\varphi\left[\frac{\sigma}{R(t)}, \tau\right]$ определялись как отношения деформаций ползучести, образовавшихся за первые четыре дня с момента загрузки, к величине $f(t - \tau_0 = 4 \text{ суток})$.

Предполагалось, что влиянием старения за время 4 суток можно пренебречь, если возраст τ_0 не менее 29 дней. Для возраста 7 и

14 суток график $\varphi\left(\frac{\sigma}{R}\right)$ был принят таким же, как и для возраста 29 суток (фиг. 5).



Фиг. 4. Графики функций $\varphi\left(\frac{\sigma}{R}, \tau\right)$ для различных значений возраста (к опытам К. С. Карапетяна).



Фиг. 5. График функции $f(t - \tau)$ (к опытам К. С. Карапетяна).

Имея график функций $f(t - \tau)$ и $\varphi\left[\frac{\sigma}{R(\tau)}, \tau\right]$, а также график роста прочности $K(\tau)$, можно построить кривые ползучести по зависимости (4) для разных возрастов загрузки и при разных величинах относительного напряжения в момент загрузки. При этом деформации ползучести определяются по приближенной формуле

$$\epsilon_s(t, \tau_0) = \int_0^t \varphi\left[\frac{\sigma(\tau_0)}{R(\tau)}, \tau\right] f'(\tau - \tau_0) d\tau \approx \sum \varphi\left[\frac{\sigma(\tau_0)}{R(\tau_{0i})}, \tau_{0i}\right] \Delta_i f(\tau - \tau_0)$$

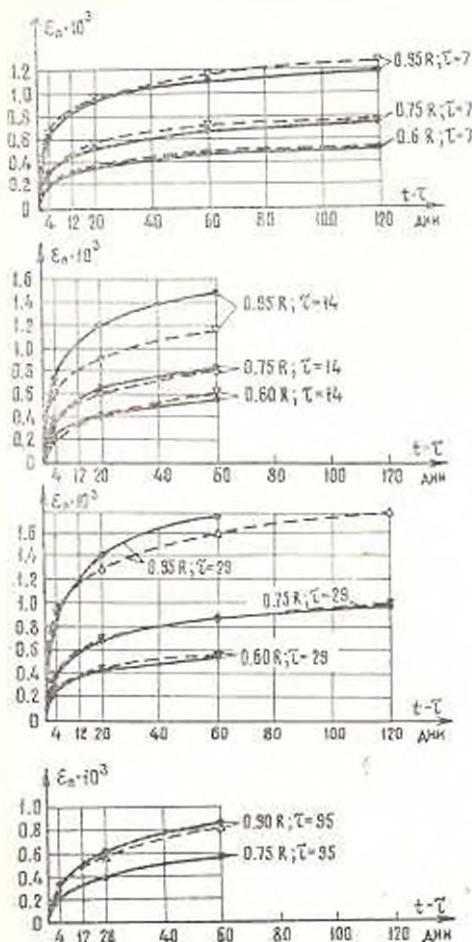
где

$$\Delta_i f = f(\tau_{0i} - \tau_0) - f(\tau_{0i-1} - \tau_0), \quad \tau_{0i} = \frac{\tau_i - \tau_{0i-1}}{2} + \tau_{0i-1} \quad (9)$$

По определенным таким образом величинам деформаций ползучести построены графики (фиг. 6) для величин относительных напряжений 0,95R, 0,75R и 0,6R и возрасте 7, 14, 29 и 95 суток. Пунктиром нанесены на графики экспериментальные кривые ползучести. Несмотря на довольно значительные расхождения между отдельными кривыми, в

общем наблюдается хорошее совпадение расчетных и экспериментальных кривых.

Таким образом, хотя зависимость (4) не отражает полностью картину деформирования при высоких сжимающих напряжениях, все же ею,



Фиг. 6. Кривые ползучести $\epsilon_s(t, \tau)$ при постоянном $\sigma(t, \tau)$ для различных возрастных и относительных напряжений. Сплошными линиями показаны кривые, построенные по формуле (4), где функции τ и f даны на фиг. 4, 5 (к опытам К. С. Каранегяна).

с помощью функций f' (учитывающей длительность действия нагрузки), $\epsilon = \left| \frac{\sigma}{R(\gamma)} \right| \eta$ (учитывающей влияние величины относительного напряжения и возраста) и графика роста прочности можно удовлетворительно описать рост деформаций с учетом старения бетона.

Ленинградский политехнический институт

Поступил 22 VI 1966

Ե. Լ. ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ

ԿՆՆՏՐՈՆԱԿԱՆ ՍԵՂՄԱՆ ԺԱՄԱՆԱԿ ԲԵՏՈՆԻ ՈՉ ԳԵԱՅԻՆ ՍՈՂՔԻ ՄԱՍԻՆ

Ու մ փ ո փ ու լ մ

Հուլվածում հետազոտվում է ոչ գծային տիրույթում աֆինյան նմանության հիպոթեզի և վերադրման սկզբունքի կիրառման հնարավորությունը: Յուրյ է տրված, որ բնանավորման ևրկարատեսության ֆունկցիայի համապատասխան բնութագրումն և ոչ մեծ ծերացման դեպքում, երկու ենթադրությունները կարելի է տարածել ոչ գծային տիրույթում: Հետազոտվել են ինչպես Կ. Ս. Կարապետյանի [9, 10], Ն. Ի. Կատինի [8], այնպես էլ հեղինակի կողմից 1963 թ. [7] խմբեներական կոնստրուկցիաների ամբիոնի շարքատորիում կատարված փորձերը:

Եռայն փորձերի հիման վրա ցույց է տրված Գ. Ի. Վասիլևի [4-5] կողմից առաջարկված բանաձևերի կիրառման հնարավորությունը մերացող բևտոնի սողքի նկարագրման համար:

E. L. MANUKIAN

ON THE NONLINEAR CREEP OF CONCRETE AT CENTRAL COMPRESSION

S u m m a r y

In this article the experimental results, obtained by the author and other investigators, on the nonlinear creep of compressed concrete are analysed.

The approximate applicability of the hypothesis of affinity of creep curves and the principle of superposition in nonlinear creep is shown.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Арутюнян Н. Х. Некоторые вопросы теории ползучести. М., 1952.
2. Васильев П. И. Некоторые вопросы пластических деформаций бетона. Известия ВНИИГ, т. 49, 1953.
3. Васильев П. И. Об использовании последственных теорий для описания законов деформирования бетона. Известия ВНИИГ, т. 53, 1955.
4. Васильев П. И. Влияние старения бетона на вид кривых ползучести. Известия ВНИИГ, т. 57, 1957.
5. Васильев П. И. Пластические свойства бетона и их влияние на работу бетонных сооружений. Сборник статей «Теория расчета и конструирования железобетонных конструкций». ГИСиА. М., 1958.
6. Васильев П. И. Пластические свойства бетона и их влияние на работу бетонных сооружений. Доклад № 46, ВНИИГ, 1957.
7. Вульфсон С. Э. К нелинейной теории ползучести. Сборник «Ползучесть строительных материалов и конструкций». ЦНИИСК, 1964.

8. Катин Н. И. Исследование ползучести бетона при высоких напряжениях. Труды НИИЖБ, вып. 4, 1959.
9. Карпетян К. С. Ползучесть бетона при высоких напряжениях. Известия АН АрмССР, т. 6, № 2, 1953.
10. Карпетян К. С. Влияние старения бетона на зависимость между напряжениями и деформациями ползучести. Известия АН АрмССР, т. 12, № 4, 1959.
11. Манукян М. М. Напряженное состояние в сжатых железобетонных элементах с учетом нелинейной ползучести бетона. Известия АН АрмССР, сер. физ.-мат., естеств. и техн. наук, т. 7, № 1, 1954.
12. Манукян М. М. Определение напряжений в некоторых железобетонных элементах с учетом ползучести и изменения модуля мгновенной деформации бетона. Известия АН АрмССР, сер. физ.-мат., естеств. и техн. наук, т. 7, № 6, 1954.
13. Улицкий И. И., Чжан Чжун-яо, Голишга А. Б. Расчет железобетонных конструкций с учетом длительных процессов. Киев, 1960.
14. Улицкий И. И. Определение величин деформаций ползучести и усадки бетонов. Киев, 1963.
15. Черняк К. И. Эпоксидные компаунды и их применение. А., 1959.