

ТЕОРИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ

К. С. КАРАПЕТЯН

ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО СЖАТИЯ НА ПРОЧНОСТЬ
И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ БЕТОНА

Исследованию влияния длительного нагружения на прочность и деформативность бетона посвящены работы А. В. Саталкина и Б. А. Сенченко [8], Р. Лермита [7], Н. И. Катина [6], автора настоящей работы [5] и других.

Исследования автора [5] показали, что длительное кручение бетона, когда интенсивность напряжения в момент нагружения не превышает 0,6—0,7, практически не оказывает влияния на конечную прочность бетона на кручение. При более высокой интенсивности напряжения длительное кручение приводит к некоторому понижению прочности бетона. Так, например, при интенсивности напряжения 0,9 понижение прочности составляет примерно 20%.

Длительное кручение качественно и количественно влияет и на деформативность бетона. Когда в момент приложения длительной нагрузки интенсивность напряжения не превышает 0,75, это приводит к уменьшению деформаций кручения бетона, а при более высокой интенсивности напряжения имеет место обратное явление.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния длительного обжатия на прочность и деформативность бетона при сжатии в зависимости от интенсивности напряжения и возраста бетона к моменту длительного нагружения.

§ I. Методика исследования

В работе [4] нами были приведены результаты исследования линейной и нелинейной ползучести бетона при сжатии с учетом фактора старения бетона. В работу вошли результаты большой серии опытов, в которых наибольшая длительность нагружения для образцов, нагруженных в молодом возрасте ($\tau=7$ дней), тогда составляла 285 дней. Однако, после этого все образцы продолжали оставаться под нагрузкой и велись наблюдения за их дальнейшими деформациями. В дальнейшем, помимо образцов, нагруженных длительной нагрузкой в возрастах 7, 14, 29, 95 и 185 дней, были нагружены образцы в годичном возрасте.

Опыты были поставлены над тяжелым бетоном, мелким заполнителем которого являлся кварцевый песок, а крупным заполнителем — ба-

зальтовый щебень. В качестве вяжущего был применен портландцемент марки 400. Состав бетона приведен в табл. 1.

Таблица 1

Состав бетона по весу	Расход материалов на 1 м ³ в кг				Объемный вес бетона в месячном возрасте в кг/м ³
	цемент	песок	щебень	вода	
1:4, 70:3,53	230	1001	811	187	2230

Опыты были поставлены на цилиндрических образцах диаметром 10 см, высотой 60 см. Образцы бетонировались в металлических разборных формах. Приготовление бетона производилось вручную, а уплотнение — на виброплощадке при продолжительности вибрации 15 секунд. Образцы освобождались от форм через одни сутки и далее хранились в помещении, где $T=20 \pm 5^\circ\text{C}$, а относительная влажность $P=80 \pm 10\%$.

Всего было приготовлено 5 замесов бетона и изготовлено 250 цилиндрических образцов и соответствующее количество кубиков размерами ребер 10 см.

Количество длительно нагруженных образцов, их возрасты (τ), напряжения и относительные напряжения в момент длительного нагружения приведены в табл. 2. Одновременно приводятся и прочностные характеристики бетона в различных возрастах.

Таблица 2

Данные о нагруженных образцах

τ в днях	R_k в кг/см ²	$R_{\text{н}}$ в кг/см ²	$\frac{\sigma}{R_{\text{н}}}$	σ в кг/см ²	Количество
1	2	3	4	5	6
7	86	41,2	0,25	10,3	2
			0,50	20,6	3
			0,60	24,7	3
			0,75	30,9	3
			0,90	37,1	4
			0,95	39,1	1
14	105	52,9	0,25	13,2	2
			0,50	26,4	3
			0,60	31,7	3
			0,75	39,7	3
			0,90	47,6	3
			0,95	50,3	1
29	132	64,3	0,25	16,1	3
			0,50	32,2	3
			0,60	38,6	3
			0,75	48,2	3
			0,90	57,9	3
			0,95	61,1	3

1	2	3	4	5	6
95	143	74,9	0,25	18,7	3
			0,50	37,4	3
			0,60	44,9	3
			0,75	56,1	3
			0,90	67,4	3
185	141	78,3	0,25	19,6	3
			0,50	39,2	3
			0,60	47,0	3
			0,75	58,7	3
			0,90	70,5	4
			0,95	74,4	2
365	161	86,0	0,25	21,5	3
			0,50	43,0	3
			0,60	51,6	3
			0,75	64,5	3

После разгрузки образцов из-под длительной нагрузки и наблюдений за восстановлением деформаций ползучести все образцы были испытаны под кратковременной нагрузкой с целью изучения влияния длительного сжатия на цилиндрическую прочность и деформативность бетона. Одновременно были испытаны и образцы, которые не находились под длительной нагрузкой, а были предназначены для определения усадочных деформаций.

Образцы, нагруженные в возрасте 185 дней, были разгружены по частям через 571 и 782 дней.

При испытании цилиндрических образцов до разрушения нагрузка повышалась ступенями и после каждой ступени брались отсчеты по приборам, измеряющим продольные деформации. Под каждой ступенью нагрузки образец выдерживался лишь на время, необходимое для взятия отсчетов по приборам, измеряющим деформации.

§ 2. Влияние длительного сжатия на цилиндрическую прочность бетона

Результаты испытания цилиндрических образцов приведены в табл. 3.

В табл. 3 для каждого возраста бетона к моменту длительного нагружения (τ) и относительного напряжения $\left(\frac{\tau}{R_n}\right)$ приведены как цилиндрическая прочность бетона, так и ее отношение к цилиндрической прочности соответствующих образцов, которые не были под длительной нагрузкой.

Рассмотрение данных таблицы показывает, что независимо от τ цилиндрическая прочность бетона с увеличением относительного напряжения в момент длительного нагружения повышается. Однако, в большин-

стве случаев это повышение не превышает 10% и только в отдельных случаях доходит до 19%. Вместе с этим в некоторых случаях прочность длительно обжатых образцов получилась меньше, чем усадочных образцов. Понижение R_d наблюдается у тех образцов, которые испытывали малые относительные напряжения, что никак нельзя приписать влиянию длительного обжатия.

Таблица 3

Влияние длительного сжатия на цилиндрическую прочность бетона

Возраст бетона к моменту длительного нагружения (τ) в днях	Возраст бетона к моменту испытания (τ_1) в днях	Продолжительность приложения нагрузки (t) в днях	Цилиндрическая прочность бетона (R_d) в кг/см ² при относительном напряжении в момент длительного нагружения						
			0	0,25	0,50	0,60	0,75	0,90	0,95
7	963	520	$\frac{105}{1,00}$	$\frac{99}{0,94}$	$\frac{106}{1,01}$	$\frac{102}{0,97}$	$\frac{113}{1,07}$	$\frac{112}{1,06}$	$\frac{115}{1,09}$
14	960	518	$\frac{107}{1,00}$	$\frac{108}{1,01}$	$\frac{95}{0,89}$	$\frac{106}{0,99}$	$\frac{106}{0,99}$	$\frac{117}{1,09}$	$\frac{114}{1,06}$
23	966	505	$\frac{107}{1,00}$	$\frac{101}{0,94}$	$\frac{104}{0,97}$	$\frac{105}{0,98}$	$\frac{110}{1,03}$	$\frac{109}{1,02}$	$\frac{108}{1,01}$
95	965	447	$\frac{106}{1,00}$	$\frac{123}{1,16}$	$\frac{122}{1,15}$	$\frac{122}{1,15}$	$\frac{125}{1,18}$	$\frac{127}{1,19}$	—
185	969	571	$\frac{106}{1,00}$	$\frac{119}{1,12}$	$\frac{112}{1,05}$	$\frac{116}{1,09}$	$\frac{120}{1,13}$	$\frac{117}{1,10}$	$\frac{122}{1,15}$
185	1173	782	$\frac{104}{1,00}$	$\frac{112}{1,07}$	$\frac{112}{1,07}$	$\frac{116}{1,11}$	$\frac{115}{1,10}$	$\frac{118}{1,13}$	—
365	1123	539	$\frac{109}{1,00}$	—	$\frac{106}{0,97}$	$\frac{117}{1,07}$	$\frac{118}{1,08}$	—	—

Наблюдаемое повышение и понижение цилиндрической прочности бетона находится в пределах точности опытов, так как необходимо учесть, что испытывались образцы, отношение высоты которых к диаметру составляло 6.

В итоге рассмотрения результатов изучения влияния длительного сжатия на прочность бетона можно сделать тот важный вывод, что длительное сжатие бетона даже напряжением, близким к пределу прочности, не приводит к понижению прочности бетона. Причем сказанное относится даже и к тому случаю, когда бетон нагружен в старом возрасте.

В наших опытах ни один образец, даже нагруженный в старом возрасте высоким относительным напряжением, не разрушился. Это позво-

дует отметить, что длительная прочность бетона при сжатии в большой мере зависит от возраста бетона к моменту длительного нагружения и от интенсивности нарастания прочности бетона во времени.

Как уже указывалось, образцы, которые были нагружены длительной нагрузкой в возрасте 185 дней, были разгружены по частям через 571 и 782 дней. Как видно из табл. 3, более длительное пребывание образцов под нагрузкой практически не оказало влияния на цилиндрическую прочность бетона.

§ 3. Влияние длительного сжатия на деформативность бетона

На фиг. 1 и 2 приведены кривые деформаций цилиндрических бетонных образцов после их разгрузки и испытания до разрушения. Одновременно приводятся и кривые деформаций усадочных образцов. На указанных фигурах каждый график соответствует одному возрасту бетона к моменту длительного нагружения (τ). Рассматривая график для $\tau = 7$ дней, видим, что все кривые вогнутостью обращены к оси деформаций. Причем чем больше относительное напряжение в момент длительного нагружения, тем выше расположена кривая.

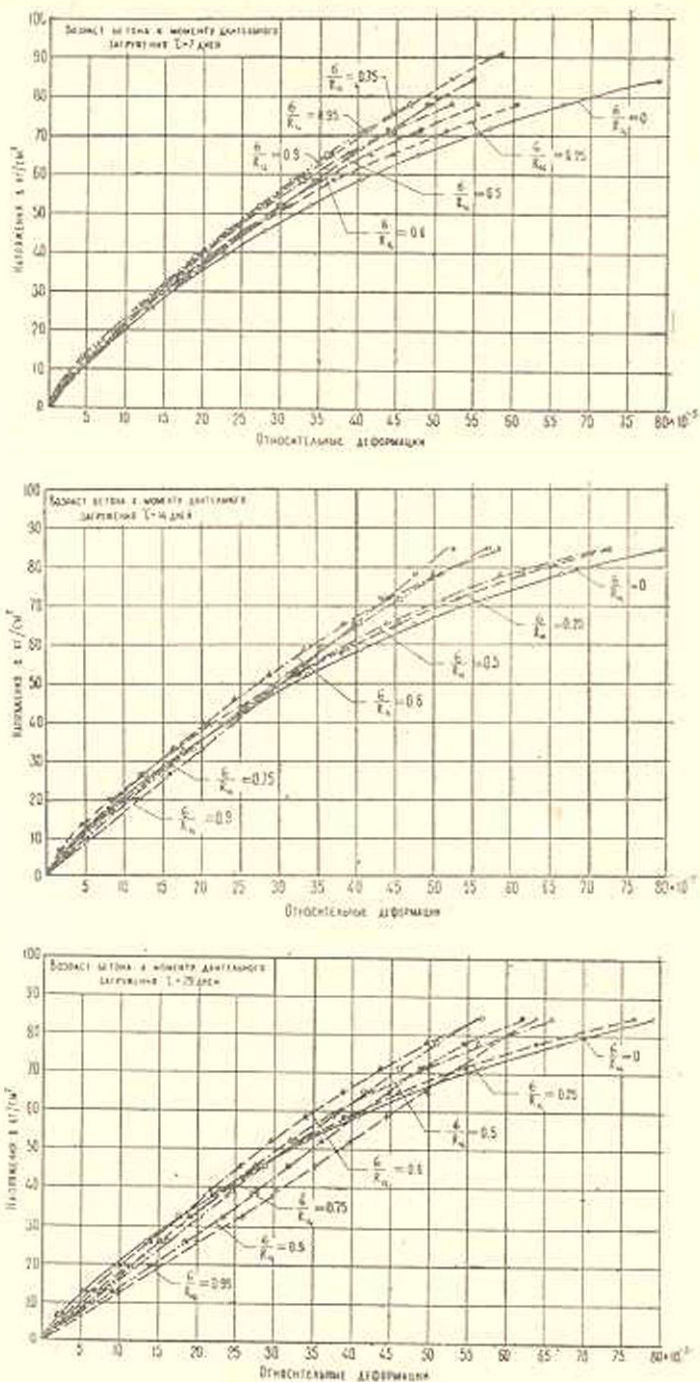
Качественно аналогичная закономерность деформаций имеет место и для тех образцов, которые соответствуют $\tau = 14$ дней. Разница заключается лишь в том, что в этом случае зависимость между напряжениями и деформациями для образцов, нагруженных относительным напряжением 0,9, уже выражается линейной зависимостью. При этом нижний участок прямой деформаций проходит ниже всех остальных кривых деформаций, а затем с повышением напряжения пересекает все кривые и далее занимает положение выше всех.

Дальнейшее увеличение возраста бетона к моменту нагружения (τ) приводит к еще большему уменьшению кривизны кривых деформаций и даже к тому, что при $\tau = 29$ дней кривые деформаций образцов, соответствующие относительным напряжениям 0,75 и 0,9, изменяют свою кривизну и вогнутостью обращаются к оси напряжений. При этом нижние участки кривых тем больше отходят от кривой деформаций усадочных образцов к оси напряжений, чем больше относительное напряжение.

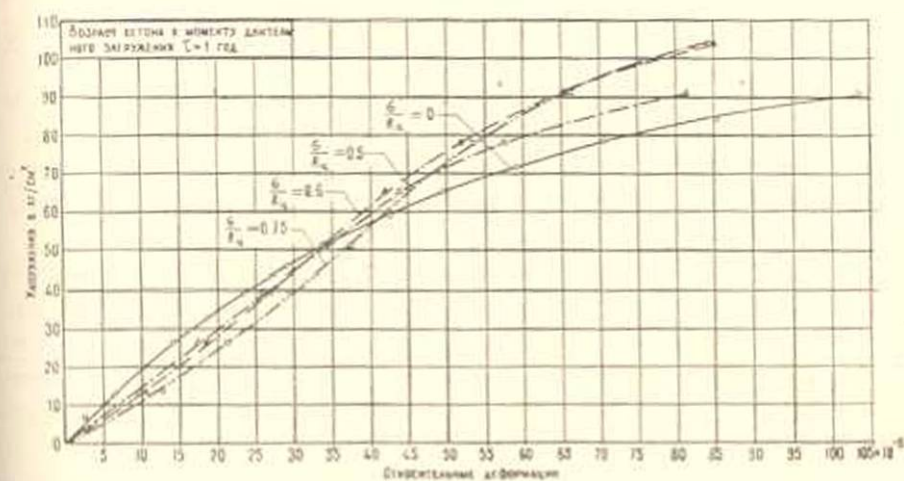
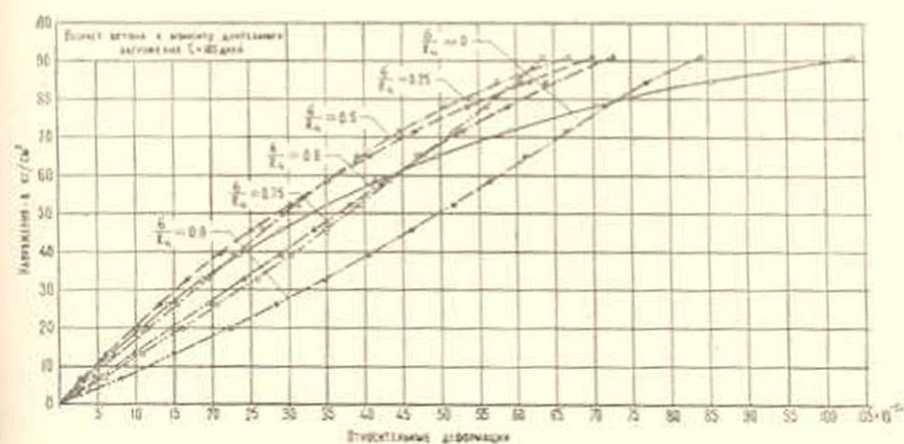
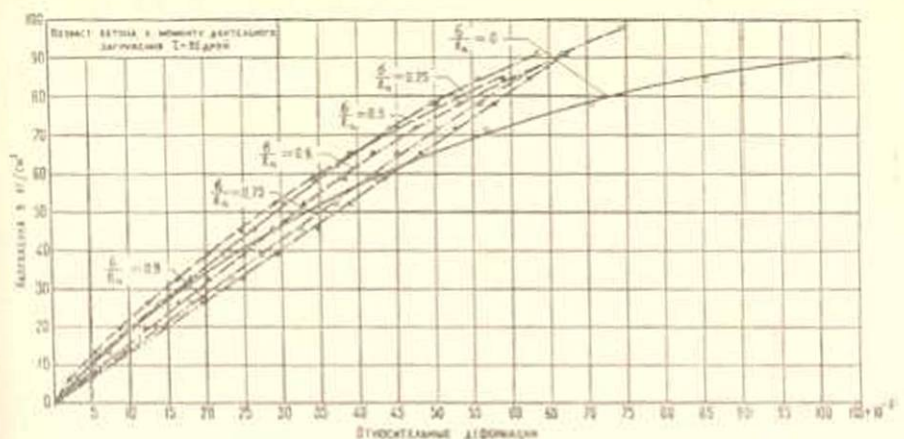
Качественно такая же закономерность деформаций имеет место и для тех образцов, которые были нагружены в более поздние возрасты. Разница заключается лишь в том, что с увеличением τ расхожимость кривых деформаций, соответствующих разным $\frac{\sigma}{R_u}$, увеличивается. Одно-

временно увеличивается и кривизна тех кривых, которые до определенных напряжений своей вогнутостью обращены к оси напряжений.

Следует также отметить, что когда начальная зависимость между напряжениями и деформациями бетона выражается прямой или кривой, вогнутостью обращенной к оси напряжений, то такая зависимость сохраняется до определенных напряжений, после чего деформации начинают расти быстрее, чем напряжения, и начальные закономерности деформаций изменяются. На последнем этапе нагружения зависимости между



Фиг. 1.



Фиг. 2.

напряжениями и деформациями по характеру опять представляют кривые, однако, уже вогнутостью обращенные к оси деформаций.

Таким образом, как видим, длительное сжатие хотя и не оказывает заметного влияния на прочность бетона, однако ее влияние на деформативность весьма существенно. Длительное сжатие приводит не только к количественным изменениям деформаций бетона, но и к существенным качественным изменениям закономерности деформаций бетона.

На фиг. 3 и 4 приведены те же кривые деформаций бетона, однако в этом случае каждый график соответствует одному значению относительного напряжения, но разным возрастам бетона к моменту длительного нагружения.

По графику, соответствующему относительному напряжению 0,25, как общая закономерность, следует, что чем старше бетон к моменту длительного нагружения, тем меньше деформации. Начиная с относительного напряжения 0,5, эта закономерность изменяется, и с повышением относительного напряжения деформации бетона возрастают.

Как видно из фиг. 3 и 4, с увеличением относительного напряжения и возраста бетона к моменту длительного нагружения изменяется и характер кривых деформаций.

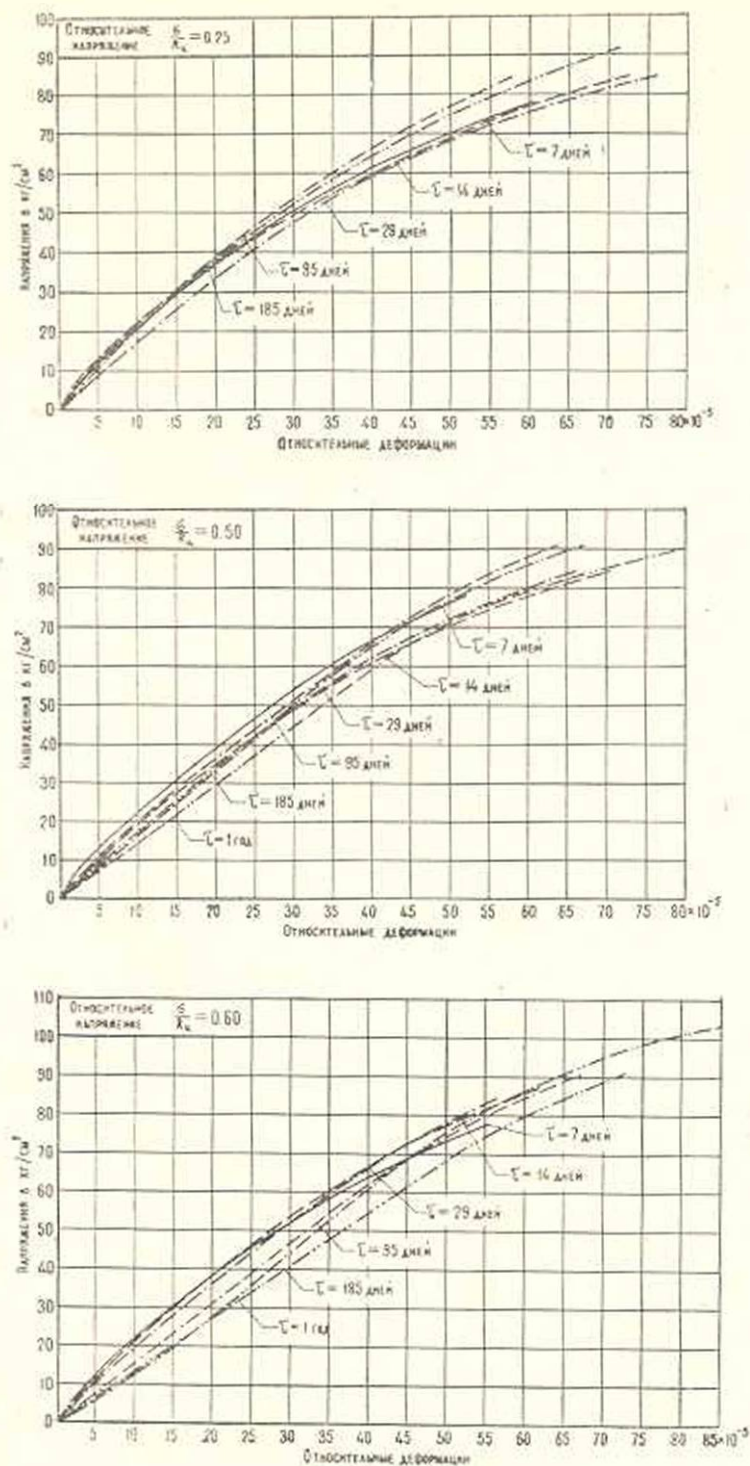
§ 4. Причины влияния длительного сжатия на деформативность бетона

В § 3 нами были рассмотрены результаты исследования длительного сжатия на деформативность бетона. При этом было установлено, что длительное сжатие в зависимости от интенсивности напряжения и возраста бетона к моменту длительного обжатия может привести к следующим трем характерным закономерностям деформаций бетона.

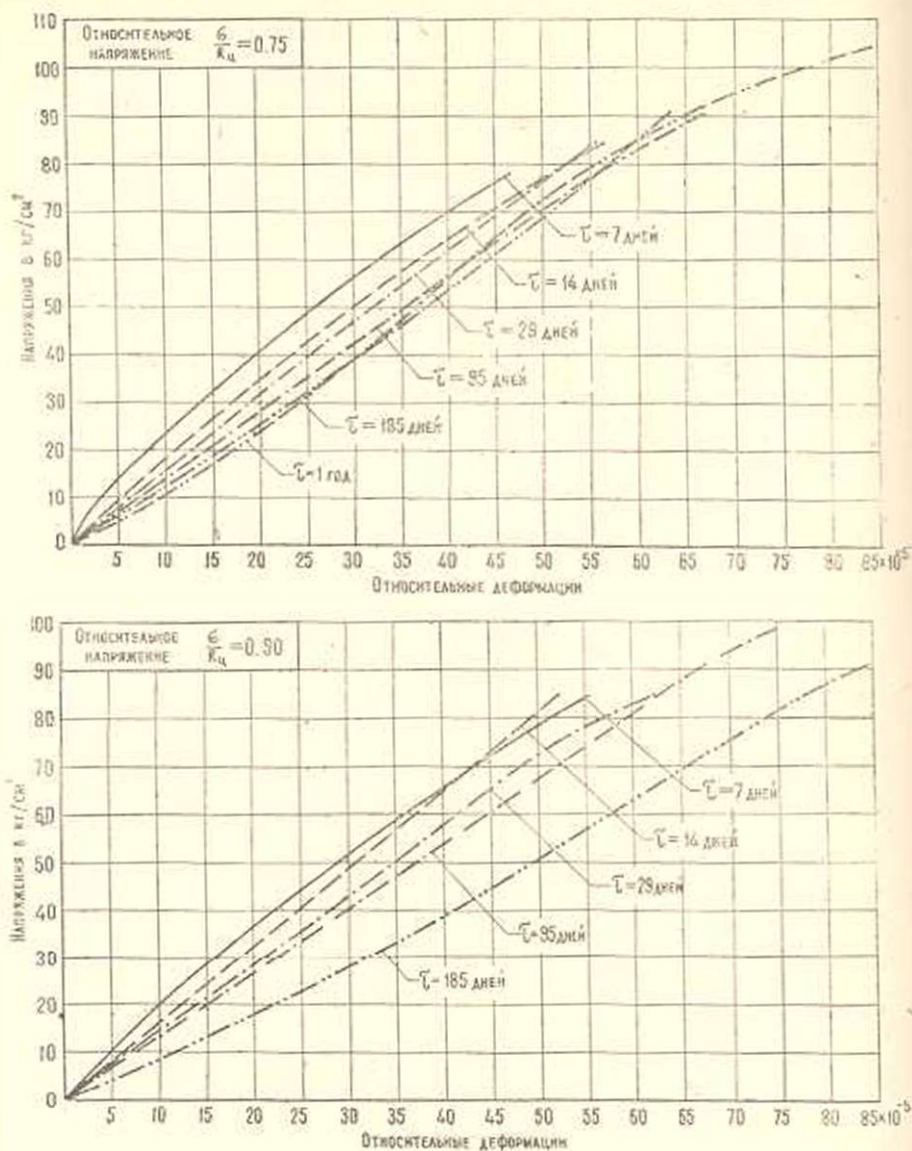
1. Кривая зависимости между напряжениями и деформациями вогнутостью обращена к оси деформаций;
2. Зависимость между напряжениями и деформациями до определенного напряжения линейна, а выше выражается кривой, вогнутостью обращенной к оси деформаций;
3. Кривая зависимости между напряжениями и деформациями до определенного напряжения вогнутостью обращена к оси напряжений, а выше вогнутостью обращена к оси деформаций.

Как известно, с момента длительного нагружения в бетоне развиваются деформации ползучести, которые в зависимости от различных факторов могут в несколько раз превосходить соответствующие упруго-мгновенные деформации. Поэтому влияние длительного сжатия на деформативность бетона, очевидно, тесно связано с закономерностями ползучести бетона.

Многочисленными опытами установлено, что до определенных напряжений имеет место линейная ползучесть, а выше — нелинейная ползучесть.



Фиг. 3.



Фиг. 4.

Наши исследования [3] показали, что напряжение, при котором кончается линейная область и начинается нелинейная область ползучести бетона, в большой мере зависит от возраста бетона к моменту длительного нагружения. При этом чем моложе бетон, тем больше то напряжение, при котором кончается линейная и начинается нелинейная область ползучести. Молодой бетон, находясь под длительной сжимающей нагрузкой, в начальный период может претерпевать нелинейную ползучесть, а спустя некоторое время — линейную ползучесть.

Как известно, О. Я. Берг установил, что при обычных кратковременных испытаниях бетона с наступлением определенного напряжения R_T в бетоне появляются разрывы, микротрещины, развитие которых с повыше-

нием напряжения приводит к разрушению бетона [1]. Первые микротрещины были обнаружены при напряжениях, составляющих примерно 0,55—0,6 от предела прочности бетона. Однако, последующие исследования О. Я. Берга показали, что напряжение R_T , характеризующее начало разрушения бетона, зависит от призмочной прочности бетона [2]. Чем прочнее бетон, тем больше R_T .

Согласно О. Я. Бергу, полная деформация бетона при сжатии состоит из следующих пяти компонентов

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_y + \varepsilon_n + \varepsilon_1 + \varepsilon_2,$$

где ε_0 — начальный участок развития деформаций; ε_y — упругие деформации; ε_n — деформации ползучести, то есть деформации, развивающиеся во времени без нарушения сплошности бетона; ε_1 — пластические деформации второго рода, связанные с развитием (при $\varepsilon > R_T$) несмыкающихся микроразрывов; ε_2 — псевдопластические деформации, которые имеют место при высоких напряжениях, когда в результате разрастания микроразрушений образуются внутренние разрушения [2].

В работе [3] мы, основываясь на исследованиях Е. Фрейсине [10], А. Е. Шейкина [11], И. И. Улицкого [9], О. Я. Берга [1] и на наших исследованиях, предложили обобщенную гипотезу механизма ползучести бетона. Согласно этой гипотезе, ползучесть бетона до напряжения 0,6 от предела прочности бетона является следствием как вязкости гелевой структурной составляющей цементного камня, так и капиллярных явлений, а при более высоких напряжениях еще и следствием появления и развития микротрещин в бетоне.

Появлением и развитием микротрещин нами объяснялось нарушение линейной зависимости между напряжениями и деформациями ползучести [3]. В дальнейшем наши более обширные исследования полностью подтвердили ранее сделанные нами выводы и дали возможность сделать ряд новых ценных выводов [4].

В начале данного параграфа мы отметили те три разные по характеру закономерности деформаций бетона, которые получились при испытании длительно обжатых цилиндрических образцов после их разгрузки. Первая из них выражается кривой, вогнутостью обращенной к оси деформаций. Как уже было показано, такую закономерность деформаций имеют те образцы, которые были нагружены длительной сжимающей нагрузкой в возрасте 7 дней вплоть до относительного напряжения 0,95, а в возрасте 14 дней — 0,75. Что касается образцов, нагруженных в возрасте более 14 дней, то такую закономерность деформаций имеют все те образцы, для которых относительное напряжение в момент их длительного нагружения составляло не более 0,5—0,6 от предела цилиндрической прочности бетона.

В табл. 4 приведены изменения относительных напряжений в длительно нагруженных образцах во времени благодаря нарастанию прочности бетона во времени. Как видно из табл. 4, нарастание прочности бе-

тона во времени приводит к заметному падению начальных высоких относительных напряжений в случае нагружения бетона в молодом возрасте. Так, например, при $\tau=7$ дней относительное напряжение 0,9 уже на 29-й день падает до значения 0,577. В результате падения относительного напряжения ползучесть, обусловленная образованием и развитием микротрещин в бетоне, затухает и далее ползучесть, в основном, протекает за счет вязкости геля и капиллярных явлений.

Таблица 4

Изменение относительных напряжений в длительно обжатых образцах во времени вследствие нарастания прочности бетона

R_n в кг/см ²	τ	σ в кг/см ²	σ/R_n	Относительное напряжение при возрасте бетона					
				14 дней	29 дней	95 дней	185 дней	1 год	3 года
41,2	7 дней	10,3	0,25	0,195	0,160	0,137	0,131	0,120	0,095
		20,6	0,50	0,390	0,320	0,274	0,252	0,240	0,190
		24,7	0,60	0,467	0,384	0,329	0,315	0,287	0,227
		30,9	0,75	0,585	0,480	0,411	0,393	0,360	0,285
		37,1	0,90	0,701	0,577	0,495	0,474	0,431	0,341
		39,1	0,95	0,739	0,609	0,522	0,500	0,455	0,360
52,9	14 дней	13,2	0,25	—	0,205	0,176	0,168	0,154	0,122
		26,4	0,50	—	0,410	0,352	0,337	0,307	0,243
		31,7	0,60	—	0,493	0,423	0,405	0,369	0,292
		39,7	0,75	—	0,615	0,530	0,507	0,461	0,365
		47,6	0,90	—	0,740	0,635	0,609	0,553	0,438
		50,3	0,95	—	0,782	0,672	0,642	0,585	0,464
64,3	29 дней	16,1	0,25	—	—	0,215	0,205	0,187	0,148
		32,2	0,50	—	—	0,430	0,411	0,374	0,297
		38,6	0,60	—	—	0,515	0,493	0,448	0,356
		48,2	0,75	—	—	0,641	0,616	0,561	0,445
		57,9	0,90	—	—	0,773	0,739	0,673	0,533
		61,1	0,95	—	—	0,816	0,780	0,710	0,563
74,9	95 дней	18,7	0,25	—	—	—	0,239	0,217	0,172
		37,4	0,50	—	—	—	0,478	0,235	0,345
		44,9	0,60	—	—	—	0,573	0,522	0,413
		56,1	0,75	—	—	—	0,717	0,652	0,517
		67,4	0,90	—	—	—	0,861	0,784	0,621
78,3	185 дней	19,6	0,25	—	—	—	—	0,228	0,180
		39,2	0,50	—	—	—	—	0,456	0,360
		47,0	0,60	—	—	—	—	0,546	0,433
		58,7	0,75	—	—	—	—	0,682	0,540
		70,5	0,90	—	—	—	—	0,820	0,650
		74,4	0,95	—	—	—	—	0,865	0,686
86,0	1 год	21,5	0,25	—	—	—	—	—	0,198
		43,0	0,50	—	—	—	—	—	0,396
		51,6	0,60	—	—	—	—	—	0,475
		64,5	0,75	—	—	—	—	—	0,594

Таким образом, изменение деформативных свойств молодого бетона в результате длительного обжатия, в основном, является следствием линейной ползучести бетона за счет вязкости геля и капиллярных явлений. Линейная ползучесть приводит к уплотнению структуры бетона, причем уплотнение тем больше, чем больше относительное напряжение в момент длительного нагружения бетона. Именно этим следует объяснить то явление, что на фиг. 1 кривые деформаций длительно обжатых образцов расположились выше кривой деформаций тех образцов, которые не были под длительной сжимающей нагрузкой, причем тем выше, чем больше было относительное напряжение в момент длительного нагружения. С повышением относительного напряжения уменьшается и кривизна кривых деформаций.

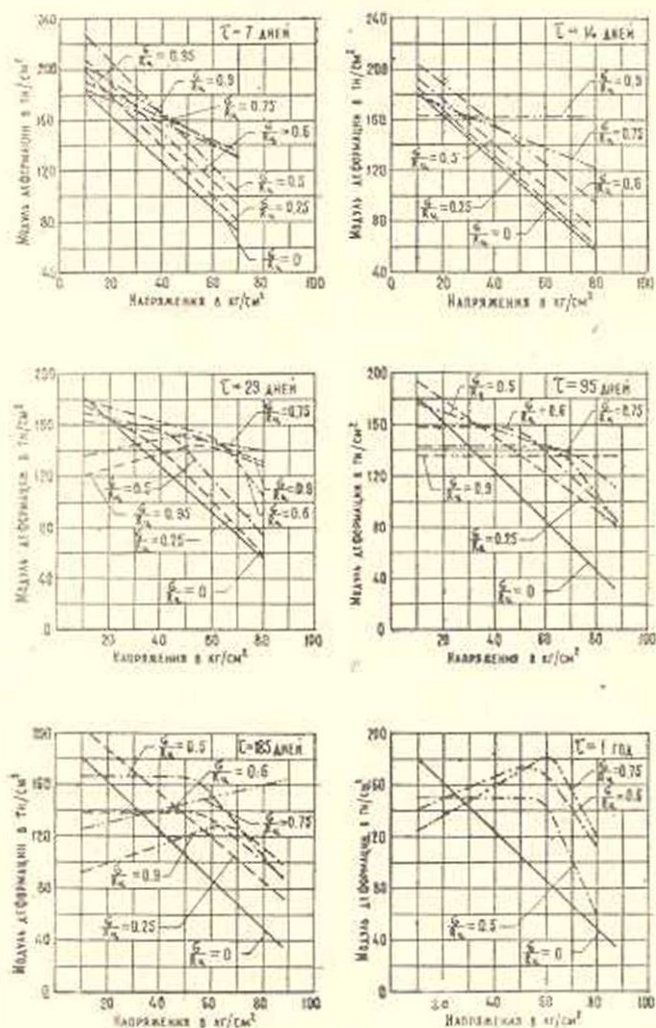
На основании вышесказанного нетрудно заключить, что характер кривых деформаций длительно обжатых образцов в данном случае ($\tau=7$ дней) качественно сохранился обычным, так как ползучесть за счет образования и развития микротрещин в бетоне имела скоропроходящий характер и поэтому не успела оказать свое отрицательное влияние на деформативность бетона.

То же самое явление мы наблюдали и в том случае, когда образцы были нагружены длительной нагрузкой в возрасте 14 дней относительным напряжением до 0,75. Однако, кривая деформаций образцов, для которых относительное напряжение составляло 0,9, уже качественно имеет другой характер. В этом случае, как уже указывалось, закономерность деформаций до определенного напряжения линейна, а выше выражается кривой, вогнутостью обращенной к оси деформаций.

Мы пока воздержимся от рассмотрения причин, приводящих к такой закономерности деформаций и сперва рассмотрим тот случай, когда зависимость между напряжениями и деформациями бетона в результате длительного сжатия представляет кривую, причем до определенного напряжения вогнутостью обращенную к оси напряжений, а выше — к оси деформаций. Подобную закономерность деформаций имеют те образцы, которые были нагружены длительной нагрузкой в возрастах 29 и 185 дней и 1 год относительным напряжением более 0,6 (фиг. 1 и 2). Причиной этого несомненно является ползучесть бетона вследствие образования и развития микротрещин, отрицательное влияние которого на деформативность бетона увеличивается с увеличением τ . Объясняется это тем, что чем больше τ , тем меньше дальнейшее нарастание прочности бетона во времени, а поэтому и меньше падение начального высокого относительного напряжения. А сохранение высокого относительного напряжения приводит как к более длительным, так и большим деформациям ползучести за счет образования и развития микротрещин. Именно с этим связано то, на первый взгляд, необычное явление, что кривая деформаций длительно обжатого бетона до определенного напряжения вогнутостью обращена к оси напряжений, а выше вогнутостью обращена к оси деформаций.

Как известно, в момент разгрузки бетона из-под длительной нагруз-

ки мгновенно восстанавливается часть упругой деформации, а далее во времени — часть деформации ползучести. Восстановление деформаций вызвано тем, что в момент длительного нагружения заполнитель бетона деформируется лишь упруго, а поэтому при разгрузке стремится восстановить свою первоначальную форму, однако этому препятствует затвердевший во времени цементный камень. По этой причине имеет место не полное, а частичное восстановление деформаций.

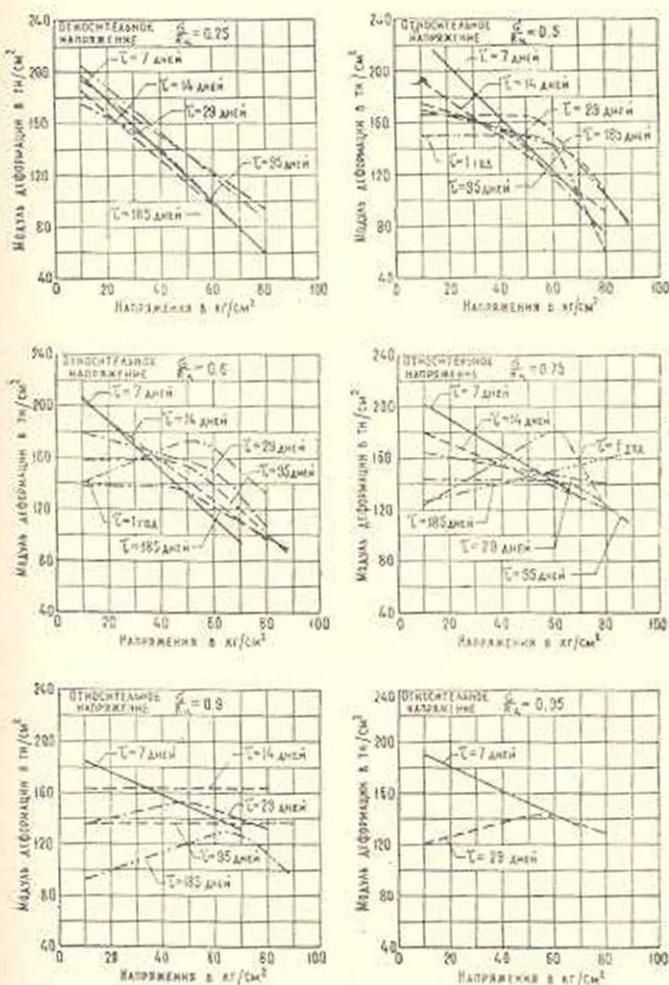


фиг. 5.

Обратимость деформаций зависит от большого количества факторов, из числа которых одним из важных является величина напряжения, в зависимости от которого, как уже отмечалось, может иметь место линейная и нелинейная ползучесть.

В рассматриваемом нами случае, поскольку имела место нелинейная ползучесть, в момент разгрузки бетона и в дальнейшем, помимо обратимых деформаций за счет деформаций упруго-деформированного заполни-

тия, частично восстановятся и те деформации ползучести, которые являются следствием образования и развития микротрещин. При этом происходит смыкание микротрещин, которые нарушили сплошность бетона. Однако, вполне понятно, что при повторном нагружении такого бетона сжимающей нагрузкой его деформации до определенного напряжения будут складываться из упругих деформаций и деформаций за счет раскрытия ранее образовавшихся микротрещин. При этом с повышением напря-



Фиг. 6.

тия сопротивляемость раскрытию микротрещин будет возрастать до того момента, пока наступит то относительное напряжение, которое было в бетоне в момент его разгрузки из-под длительной нагрузки, к которой бетон уже приспособился в период длительного нагружения. Вот та основная причина, которая привела к рассматриваемой нами закономерности деформаций длительно обжатого бетона, когда связь между напряжениями и деформациями до определенного относительного напряжения имеет вид кривой, вогнутостью обращенной к оси напряжений.

Однако, как только относительное напряжение благодаря дальнейшему повышению сжимающей нагрузки превысит то относительное напряжение, которое испытывал бетон в момент разгрузки из-под длительной нагрузки, микротрещины получают дальнейшее развитие и наступит разрушение. По этой причине на последнем этапе начальная закономерность деформаций изменяется и приобретает вид кривой, вогнутостью обращенной к оси деформаций.

Теперь, когда мы выяснили причины первой и третьей характерных закономерностей деформаций длительно обжатого бетона, нетрудно объяснить и причины второй характерной закономерности, которая до определенного напряжения представляет прямую, а выше — кривую, вогнутую к оси деформаций. Указанная закономерность есть нечто среднее между двумя ранее рассмотренными закономерностями деформаций длительно обжатого бетона. Поэтому ясно, что в зависимости от различных факторов сочетание положительной роли ползучести бетона за счет вязкости геля и капиллярных явлений, а также отрицательной роли ползучести за счет образования и развития микротрещин может привести к такой закономерности.

На фиг. 5 и 6 приведены кривые изменения модулей деформаций в зависимости от напряжения длительно обжатого бетона. На фиг. 5 каждый график соответствует одному возрасту бетона к моменту длительного нагружения, а на фиг. 6 одному значению относительного напряжения.

На основании фиг. 5 и 6 можно получить более наглядное представление о влиянии длительного обжатия на деформативность бетона.

В ы в о ы

1. Длительное сжатие практически не оказывает влияния на прочность бетона даже в тех случаях, если бетон нагружается в старом возрасте относительным напряжением 0,9—0,95.

2. Длительное сжатие оказывает существенное влияние на деформативность бетона. В зависимости от величины напряжения и возраста бетона к моменту длительного нагружения, длительное сжатие может привести как к уменьшению, так и к увеличению деформаций бетона.

3. Влияние длительного сжатия на деформативность бетона обусловлено ползучестью бетона, которая в зависимости от величины напряжения и возраста бетона к моменту длительного нагружения может быть линейной и нелинейной.

4. Линейная ползучесть бетона при сжатии, независимо от возраста бетона к моменту длительного нагружения, приводит к уплотнению бетона и тем самым к уменьшению его деформаций. Уменьшение деформаций тем больше, чем больше относительное напряжение в момент длительного нагружения бетона.

5. Нелинейная ползучесть в зависимости от возраста бетона к моменту длительного нагружения и величины напряжения может привести как к уменьшению, так и к увеличению деформаций бетона.

Уменьшение деформаций имеет место в том случае, когда бетон нагружен в молодом возрасте. Интенсивный рост прочности бетона во времени приводит к быстрому падению начального высокого относительного напряжения и тем самым к затуханию деформаций ползучести за счет образования и развития микротрещин в бетоне, которые обуславливают нелинейную ползучесть. Ввиду скоропроходящего характера, нелинейная ползучесть не успевает оказать своего отрицательного влияния на деформативность бетона, а если и успевает, то оно компенсируется положительной ролью линейной ползучести.

Увеличение деформаций имеет место в том случае, когда бетон нагружен в зрелом возрасте. В этом случае дальнейшее нарастание прочности бетона во времени уже не столь существенно, чтобы смогло бы заметно уменьшить начальное высокое относительное напряжение и тем самым привести к затуханию деформаций ползучести вследствие образования и развития микротрещин. Поэтому основным фактором, определяющим деформации бетона, уже становится ползучесть, обусловленная образованием и развитием микротрещин, так как положительное влияние линейной ползучести на деформативность бетона уже не может полностью компенсировать отрицательное влияние ползучести за счет образования и развития микротрещин. По этой причине чем больше напряжение, тем больше деформации длительно обжатого бетона.

6. Длительное сжатие приводит к изменению характера закономерности деформаций бетона. В зависимости от величины относительного напряжения и возраста бетона к моменту длительного нагружения, длительное сжатие может привести к следующим характерным закономерностям деформаций бетона:

а. Кривая зависимости между напряжениями и деформациями вогнутостью обращена к оси деформаций. Такая закономерность деформаций имеет место независимо от возраста бетона к моменту длительного нагружения, во-первых, в пределах линейной ползучести и, во-вторых, тогда, когда бетон нагружен высокими напряжениями в молодом возрасте, однако благодаря нарастанию прочности бетона во времени нелинейная ползучесть имеет скоропроходящий характер;

б. Зависимость между напряжениями и деформациями до определенного напряжения линейна, а выше криволинейна (кривая вогнутостью обращена к оси деформаций). Такая закономерность деформаций имеет место при некотором сочетании положительного влияния линейной ползучести и отрицательного влияния ползучести за счет образования и развития микротрещин, зависящих от возраста бетона и величины относительного напряжения в момент длительного нагружения;

в. Кривая зависимости между напряжениями и деформациями до определенного напряжения вогнутостью обращена к оси напряжений, а выше—вогнутостью обращена к оси деформаций. Такая закономерность характерна для того случая, когда бетон нагружен в зрелом возрасте, претерпевающим нелинейную ползучесть, в результате чего отрицатель-

ное влияние ползучести на деформативность бетона за счет образования и развития микротрещин преобладает над положительным влиянием линейной ползучести.

Институт математики и механики
АН Армянской ССР

Поступила 27 VI 1964

Կ. Ս. ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ

ԵՐԿԱՐԱՏԵՎ ՍԵՂՄՄԱՆ ԱՂԴԵՅՈՒԹՅԱՆՆԵՐ ԲԵՏՈՆԻ ԱՄՐՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԴԵՖՈՐՄԱՏԻՎ ՀԱՏՆՈՒԹՅԱՆՆԵՐԻ ՎՐԱ

Ա մ փ ո փ ո լ մ

Հետազոտությունները ցույց են տվել, որ երկարատև սեղմումը կապի չի ազդում բետոնի ամրության վրա, բայց նրա աղդեցությունը գեֆորմացիոն հատկությունների վրա մեծ է: Նախած բեռնավորման մոմենտում բետոնի հասակին և լարումների մեծություններին, երկարատև սեղմումը կարող է բերել գեֆորմացիաների ինչպես փորրացման, այնպես էլ մեծացման:

Երկարատև սեղմումը բերում է գեֆորմացիաների պակասեցման, երբ բետոնը բեռնավորված է փորր հասակում անկախ լարման մեծությունից, քանի որ բետոնի ամրության հետագա աճը արագ կերպով իջեցնում է սկզբնական բարձր հարաբերական լարումը, միաժամանակ մարելով սողքի գեֆորմացիաները:

Երբ ծերացած բետոնը բեռնավորվում է մեծ լարումով, ամրության հետագա աճը արդեն ի վիճակի չէ նկատելի կերպով փորրացնելու սկզբնական մեծ հարաբերական լարումը և զրանով նպաստելու ոչ զծային սողքի գեֆորմացիաների մարմանը:

Այս գեպում երկարատև սեղմումը բերում է գեֆորմացիաների մեծացման, քանի որ զծային սողքի բարերար աղդեցությունը, որն արտահայտվում է բետոնի խտացմամբ, ի հաշիվ սոսաջացած մաղաձաքերի, այլևս չի կարող փոխհատուցել սողքի բացասական աղդեցությունը:

Նախած բեռնավորման մոմենտում բետոնի հասակին և հարաբերական լարման մեծությունը, երկարատև սեղմումը կարող է բերել լարումների ու գեֆորմացիաների կապի բնույթի փոփոխման:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Берг О. Я. К вопросу о прочности и пластичности бетона. ДАН СССР, 12, № 4, 1950.
2. Берг О. Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона, Гостройиздат, М., 1962.
3. Карапетян К. С. Ползучесть бетона при высоких напряжениях. Известия АН АрмССР, серия физ.-мат., ест. и техн. наук, 5, № 4, 1952.
4. Карапетян К. С. Влияние старения бетона на зависимости между напряжениями и деформациями ползучести. Известия АН АрмССР, серия физ.-мат. наук, 12, № 4, 1959.

5. *Карпетян К. С.* Ползучесть бетона при кручении. Известия АН АрмССР, серия физ.-мат. наук, 15, № 6, 1962.
6. *Катин Н. И.* Исследование ползучести бетона при высоких напряжениях. Сборник НИИЖБ, „Исследование свойств бетона и железобетонных конструкций“, Госстройиздат, М., 1959.
7. *Дермит Р.* Проблемы технологии бетона. Госстройиздат, М., 1959.
8. *Саталкин А. В., Севченко Б. А.* Раннее нагружение бетона и железобетона в мостостроении. Автотрансиздат, М., 1956.
9. *Улицкий Н. И.* Ползучесть бетона. Гостехиздат Украины, Киев, 1948.
10. *Фрейсине Е.* Переворот в технике бетона. ОНТИ, 1938.
11. *Шейкин А. Е.* К вопросу прочности, упругости и пластичности бетона. Труды МИИТ, вып. 69, Трансжелдориздат, М., 1946.