

К. С. КАРАПЕТЯՆ, Բ. Ա. ԿՈՏԻԿՅԱՆ, Բ. Մ. ԱԳԱԺՅԱՆԻ

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАТИМЫХ ДЕМОРМАЦИЙ ДЛИТЕЛЬНО РАСТЯНУТОГО БЕТОНА ПОСЛЕ ЕГО РАЗГРУЗКИ

Исследования, посвященные изучению обратимости упруго-мгновенных деформаций и деформаций ползучести после разгрузки длительно нагруженного бетона, пока весьма малочисленны. При этом существующие исследования, в основном, относятся к изучению обратимости деформаций бетона после предшествующего длительного сжатия.

В настоящей работе приводятся результаты большой серии опытов по исследованию обратимости упруго-мгновенных деформаций и деформаций ползучести длительно растянутого бетона в зависимости от возраста ( $\tau$ ) и уровня напряжения ( $\sigma/R_p$ ) в момент длительного нагружения. На длительное растяжение опытные образцы загружались как постоянными, так и ступенчато-возрастающими растягивающими напряжениями.

Испытанию подвергались большие восьмерки сечением  $10 \times 10$  см, высотой 60 см, изготовленные из тяжелого бетона. Для приготовления бетона применялись: базальтовый щебень, кварцевый песок и портланд-цемент Араратского завода (г. Ереван) марки 500. Состав бетона (по массе) 1:2, 13:2,91, ВЦ=0,635.

Для постановки намеченных программой опытов из пяти замесов бетона было изготовлено 150 восьмерок и необходимое количество кубиков с ребром 10 см. Образцы бетонировались в вертикальных формах с продолжительностью вибрации 30 сек. После расформовки образцов, которая осуществлялась через 2 сут, все они находились в помещении лаборатории, где проводились длительные опыты, в процессе которых температура воздуха составляла  $T = 21 \pm 5^\circ\text{C}$ , а относительная влажность  $P = 70 \pm 10\%$ .

Для исследования ползучести бетона при постоянных и ступенчато-возрастающих растягивающих напряжениях образцы были загружены на длительное растяжение в возрасте 7, 28, 91 и 286 сут. Образцы, загруженные в каждом возрасте, принадлежали одному замесу бетона. После наблюдений за длительными деформациями все образцы были разгружены и велись наблюдения за восстановлением упруго-мгновенных деформаций и деформаций ползучести. Обратимые деформации ползучести образцов, загруженных в возрасте 7 сут, не измерялись.

Результаты исследования ползучести бетона по данным этих опытов рассмотрены в работе [4], где была подробно описана и методика этих опытов.

Как известно, в процессе длительного сжатия или растяжения под действием внешней нагрузки физико-механические свойства бетона изменяются [2—3, 5—6]. Обратимость упруго-мгновенных деформаций и деформаций

ползучести тесно связана с изменением физико-механических свойств бетона, вызванным не только его твердением, но и длительным нагружением.

Влияние длительного растяжения на прочность и модуль деформаций бетона изучалось в работах [2, 5—6]. Опыты показали, что длительное растяжение может привести как к увеличению, так и к снижению прочности и модуля деформаций бетона при растяжении.

В наших опытах после разгрузки образцов и измерения обратимых упруго-мгновенных деформаций и деформаций ползучести все образцы были испытаны на растяжение до разрушения с целью изучения влияния длительного растяжения на прочность и модуль деформаций бетона. Обратимость деформаций бетона тесно связана с закономерностями влияния длительного нагружения на его физико-механические свойства. Учитывая это, мы сперва рассмотрим результаты опытов о влиянии длительного растяжения на прочность и модуль деформации бетона.

Экспериментальные данные подвергались статической обработке по методике [8]. Показатели точности в большинстве случаев не превышали 7%. Кривые полных деформаций образцов при испытании до разрушения аппроксимировались корреляционным уравнением

$$\varepsilon = \frac{a\sigma/R_p}{1 - b\sigma/R_p} \quad (1.1)$$

Опытные постоянные  $a$  и  $b$  определялись путем приведения уравнения (1.1) к линейному, учитывая, что между обратными значениями  $\varepsilon$  и  $\sigma/R_p$  существует линейная зависимость. При этом было установлено, что корреляция между обратными значениями  $\varepsilon$  и  $\sigma/R_p$  является существенно линейной.

Модули полных деформаций по касательной определялись по формуле

$$E = \frac{R_p}{a} \left( 1 - b \frac{\varepsilon}{R_p} \right)^2 \quad (1.2)$$

Прочностные показатели исследованного бетона по данным испытаний всех образцов приведены в табл. 1, откуда ясно видны и уровни напряжений образцов, нагруженных как постоянными, так и ступенчато возрастающими растягивающими напряжениями. Отметим, что в возрасте 7 и 28 сут ступенчатое повышение нагрузки производилось равными ступенями через каждые 15 сут, а в возрасте 286 сут — через 45 сут. Что касается образцов, нагруженных в возрасте 91 сут ступенчато-возрастающими нагрузками 0.2—0.4; 0.2—0.5—0.8 и 0.2—0.3—0.6—0.8, то в этих случаях каждая последующая ступень нагрузки прикладывалась через 30 сут после приложения предыдущей до этого ступени.

По данным табл. 1 нагружение образцов в возрасте 7 сут длительной растягивающей постоянной нагрузкой не сказалось отрицательно на прочности бетона на растяжение. Наоборот, прочности образцов, нагруженных уровнями напряжений 0.2 и 0.4, возросли соответственно на 18 и 10%. Что касается образцов, нагруженных уровнями напряжений 0.6 и 0.8, то в этих случаях длительное растяжение практически не сказалось на прочности бе-

тона. При загрузке бетона в возрасте 7 сут ступенчато-растягивающими напряжениями по режимам 0.2—0.4—0.6 и 0.2—0.4—0.6—0.8 положительный эффект длительного растяжения больше, чем при загрузке уровнями напряжений 0.6 и 0.8. Все это весьма закономерно и объясняется тем, что при загрузке бетона в молодом возрасте (7 сут) благодаря дальнейшему интенсивному росту его прочности во времени, уровень напряжения быстро падает. При этом во всех случаях до загрузки последней ступени ступенчато-возрастающей нагрузки уровень напряжения в режимных образцах будет меньше, чем в образцах, загруженных сразу максимальными уровнями напряжений.

Влияние длительного растяжения на прочность бетона

Таблица 1

Возраст бетона (т) в момент длительного нагружения в сут	Время нахождения образцов под длительной нагрузкой в сут	Возраст бетона к моменту испытания до разрушения в сут	Уровень напряжения от длительной растягивающей нагрузки	$R_p$ в кг/см <sup>2</sup>	Соотношение прочностей образцов, полученных и неподвергнутых длительному растяжению
7	258	285	0	12.7	1.00
			0.2	15.0	1.18
			0.4	14.0	1.10
			0.6	12.8	1.01
			0.8	12.9	1.02
			0.2—0.4	13.2	1.04
			0.2—0.4—0.6	14.4	1.13
0.2—0.4—0.6—0.8	15.5	1.22			
28	588	764	0	15.8	1.00
			0.2	14.6	0.92
			0.4	12.0	0.76
			0.6	13.5	0.85
			0.2—0.4	14.1	0.90
			0.2—0.4—0.6	12.8	0.81
91	523	824	0	15.4	1.00
			0.2	14.3	0.93
			0.4	15.4	1.00
			0.6	14.5	0.94
			0.8	15.4	1.00
			0.9	15.7	1.02
			0.2—0.4	16.0	1.04
			0.2—0.5—0.8	15.6	1.01
			0.2—0.6—0.8	13.9	0.90
			0.2—0.3—0.6—0.8	18.3	1.19
286	324	822	0	15.4	1.00
			0.2	15.3	0.99
			0.4	14.0	0.91
			0.6	15.4	1.00
			0.8	15.1	0.98
			0.2—0.4	14.7	0.95
			0.2—0.4—0.6	15.7	1.02
			0.2—0.4—0.6—0.8	15.7	1.02

Как и следовало ожидать, при загрузке бетона в более позднем возрасте положительный эффект длительного растяжения уменьшается и наблюдается спад его прочности на растяжение. Однако, в большинстве случаев снижение прочности незначительно, о чем свидетельствуют прочно-



стые показатели образцов, загруженных в возрасте 29, 91 и 286 сут (табл. 1).

Рассмотрим теперь, как влияет длительное растяжение на модуль полных деформаций бетона при растяжении. По данным табл. 2 длительное растяжение как постоянным, так и ступенчато-возрастающими напряжениями привело к существенному изменению модуля полных деформаций бетона при растяжении.

Таблица 2

Влияние длительного растяжения на модуль деформации бетона при растяжении

t в сут	Уровень напряжения от длительной растягивающей нагрузки	Модуль полных деформаций в $тн/см^2$ при уровне напряжения				Отношение модуля полных деформаций образцов, подвергнутых длительному растяжению, к модулю полных деформаций образцов, не подвергнутых длительному растяжению при уровне напряжения			
		0	0,25	0,50	0,75	0	0,25	0,50	0,75
7	0	191	157	92	56	1,00	1,00	1,00	1,00
	0,2	236	218	159	109	1,50	1,59	1,73	1,95
	0,4	241	193	150	113	1,26	1,41	1,63	2,02
	0,6	251	201	157	118	1,31	1,47	1,71	2,11
	0,8	164	147	131	116	0,85	1,07	1,42	2,07
	0,2-0,4	313	240	176	122	1,64	1,75	1,91	2,18
	0,2-0,4-0,6	244	199	158	122	1,28	1,45	1,72	2,13
0,2-0,4-0,6-0,8	247	207	170	137	1,29	1,51	1,85	2,45	
28	0	230	150	160	138	1,00	1,00	1,00	1,00
	0,2	280	223	172	138	1,22	1,17	1,08	1,00
	0,4	265	159	143	96	1,15	1,05	0,90	0,70
	0,6	224	185	150	119	0,97	0,97	0,94	0,86
	0,2-0,4	260	215	175	138	1,13	1,13	1,09	1,00
0,2-0,4-0,6	230	214	199	185	1,00	1,13	1,24	1,34	
91	0	250	229	209	190	1,00	1,00	1,00	1,00
	0,2	280	219	166	120	1,12	0,96	0,79	0,63
	0,4	280	239	202	168	1,12	1,04	0,97	0,88
	0,6	214	190	167	146	0,86	0,83	0,80	0,77
	0,8	200	162	128	98	0,80	0,71	0,61	0,52
	0,9	201	180	161	144	0,80	0,79	0,77	0,76
	0,2-0,4	260	210	166	127	1,04	0,92	0,79	0,67
	0,2-0,5-0,8	200	184	169	155	0,80	0,80	0,81	0,82
0,2-0,6-0,8	210	194	179	165	0,84	0,85	0,86	0,87	
0,2-0,3-0,6-0,8	254	218	185	155	1,02	0,95	0,89	0,82	
286	0	250	229	209	190	1,00	1,00	1,00	1,00
	0,2	280	230	180	149	1,12	1,00	0,86	0,78
	0,4	320	270	230	192	1,28	1,18	1,10	1,01
	0,6	250	240	230	221	1,00	1,05	1,10	1,16
	0,8	222	210	200	190	0,89	0,92	0,96	1,00
	0,2-0,4	250	234	186	142	1,16	1,02	0,89	0,75
	0,2-0,4-0,6	260	214	172	136	1,04	0,93	0,82	0,72
0,2-0,4-0,6-0,8	250	229	209	190	1,00	1,00	1,00	1,00	

Как видно из табл. 2, при загрузении образцов в возрасте 7 сут постоянными растягивающими нагрузками модуль деформаций бетона больше всего возрос в случае тех образцов, для которых уровень напряжения в момент длительного растяжения составлял 0,2. При этом, положительный эффект длительного растяжения тем больше, чем выше уровень

кратковременной растягивающей нагрузки при испытании до разрушения. Рост модуля деформаций бетона наблюдается и по данным испытаний образцов, нагруженных уровнями напряжений 0,4, 0,6 и 0,8, однако, положительный эффект длительного растяжения с повышением уровня напряжения уменьшается. Согласно данным табл. 2, влияние длительного растяжения существенно зависит также и от режима нагружения образцов. При нагружении образцов ступенчато-возрастающими растягивающими нагрузками прирост модуля деформаций гораздо больше, чем при нагружении постоянными растягивающими нагрузками.

Рассматривая модули деформаций образцов, нагруженных в возрасте 28 сут уровнем напряжения 0,2, нетрудно заметить, что в этом случае положительный эффект длительного растяжения намного меньше, чем в случае нагружения образцов в возрасте 7 сут тем же уровнем напряжения. Нагружение же образцов сразу уровнями напряжений 0,4 и 0,6 в возрасте 28 сут приводит к некоторому снижению модуля деформаций бетона, а при ступенчатом повышении растягивающей нагрузки по режимам 0,2—0,4 и 0,2—0,4—0,6 модуль деформаций бетона возрастает.

Рассмотрим теперь, как влияет длительное растяжение на модуль деформации бетона при  $t=91$  сут (табл. 2). В этом случае независимо от уровня напряжения и режима нагружения всегда наблюдается спад модуля деформаций. При  $t=91$  сут наблюдается некоторое различие во влиянии разных режимов нагружения ступенчато-возрастающими растягивающими напряжениями. Так, например, при режиме 0,2—0,3—0,6—0,8 отрицательное влияние длительного нагружения на модуль деформации несколько меньше, чем при нагружении по режимам 0,2—0,5—0,8 и 0,2—0,6—0,8. Таким образом, и в этом случае отрицательное влияние длительного растяжения при ступенчатом повышении напряжения несколько меньше, чем при нагружении бетона сразу постоянной растягивающей нагрузкой, величина которой равна максимальной нагрузке при ступенчатом нагружении.

Рассматривая, наконец, данные модулей деформаций образцов, нагруженных на длительное растяжение в возрасте 286 сут, нетрудно заметить, что в этом случае отрицательное влияние длительного растяжения на модуль деформации бетона оказалось не больше, а меньше, чем в случае образцов, нагруженных в возрасте 91 сут. Следует заметить, что в некоторых случаях благодаря длительному растяжению модуль деформаций бетона возрос.

Поскольку длительное растяжение оказывает влияние на прочность и деформативность бетона, то это не может не отразиться и на закономерности обратимости как упруго-мгновенных деформаций, так и деформаций ползучести. Приведенный анализ о влиянии длительного растяжения на прочность и деформативность бетона позволит нам познать закономерности обратимости упруго-мгновенных деформаций и деформаций ползучести.

Для анализа опытных данных обратимости деформаций ползучести бетона после его разгрузки из-под длительной растягивающей нагрузки соответствующие кривые представлены на фиг. 1—3. Одновременно в табл. 3 приводятся и другие данные, которые помогут этому анализу. От-

метим, что приведенные в табл. 3 значения деформаций ползучести ( $\varepsilon_n$ ) соответственно  $t=250$  сут, а обратимые деформации ползучести ( $\varepsilon_{no}$ ) —  $t=120$  сут.

Таблица 3

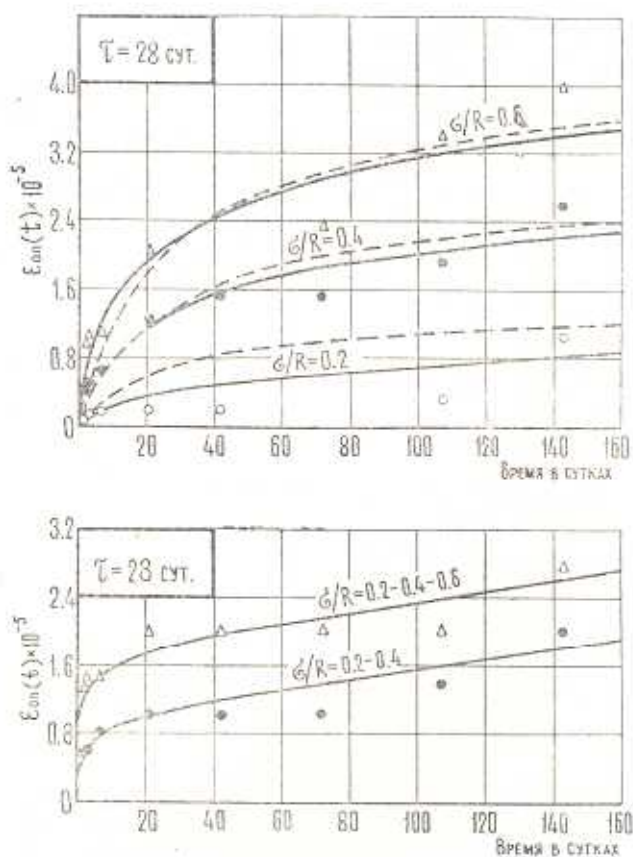
Обратимые деформации и деформации ползучести бетона после его разгрузки

$t$ в сут	Показатели	Значения показателей, когда в момент длительного нагружения постоянными нагрузками уровень напряжения составлял					Значения показателей, когда уровень напряжения в режимных образцах с момента нагружения изменился по режиму			
		0.2	0.4	0.6	0.8	0.9	0.2—0.4	0.2—0.4—0.6	0.2—0.4—0.6—0.8	
7	$\varepsilon_y \cdot 10^5$	0.64	1.28	1.92	2.55	—	—	—	—	
	$\varepsilon_{yo} \cdot 10^5$	0.81	1.89	2.76	5.61	—	1.47	2.83	3.68	
	$\varepsilon_n \cdot 10^5$	8.82	17.70	28.40	36.02	—	—	—	—	
	$\varphi_t = \varepsilon_n / \varepsilon_y$	13.82	13.86	13.80	14.10	—	—	—	—	
	$\varepsilon_{no} \cdot 10^5$	0.74	2.04	3.20	—	—	1.58	2.40	—	
28	$\varepsilon_y \cdot 10^5$	1.34	2.69	4.03	5.37	—	—	—	—	
	$\varepsilon_{yo} \cdot 10^5$	1.50	2.54	4.51	—	—	2.54	4.31	—	
	$\varepsilon_n \cdot 10^5$	9.36	19.45	32.13	50.55	—	—	—	—	
	$\varphi_t = \varepsilon_n / \varepsilon_y$	6.98	7.23	7.97	9.41	—	—	—	—	
	$\varphi_t = \varepsilon_{no} / \varepsilon_{yo}$	0.49	0.80	0.71	—	—	0.62	0.56	—	
91	$\varepsilon_y \cdot 10^5$	1.24	2.48	3.72	4.95	5.57	—	—	—	
	$\varepsilon_{yo} \cdot 10^5$	1.04	2.44	4.09	5.80	—	2.61	—	—	
	$\varepsilon_n \cdot 10^5$	2.65	5.56	9.43	15.40	19.65	—	—	—	
	$\varphi_t = \varepsilon_n / \varepsilon_y$	2.14	2.24	2.54	3.11	3.53	—	—	—	
	$\varphi_t = \varepsilon_{no} / \varepsilon_{yo}$	0.62	0.56	0.62	0.68	—	0.46	—	—	
286	$\varepsilon_y \cdot 10^5$	1.18	2.36	3.54	4.78	—	—	—	—	
	$\varepsilon_{yo} \cdot 10^5$	1.09	1.88	3.65	5.47	—	2.61	3.47	4.86	
	$\varepsilon_n \cdot 10^5$	1.29	2.82	5.24	9.60	—	—	—	—	
	$\varphi_t = \varepsilon_n / \varepsilon_y$	1.09	1.20	1.48	2.03	—	—	—	—	
	$\varphi_t = \varepsilon_{no} / \varepsilon_{yo}$	0.95	1.00	0.80	0.71	—	0.64	0.77	0.77	
	$\varepsilon_{yo} / \varepsilon_y$	0.92	0.80	1.03	1.14	—	—	—	—	
	$\varepsilon_{no} / \varepsilon_n$	0.81	0.67	0.57	0.40	—	—	—	—	

По данным образцов, нагруженных на длительное растяжение в возрасте 28 сут, при разгрузке обратимые упруго-мгновенные деформации бетона в большинстве случаев получились больше, чем соответствующие упруго-мгновенные деформации в момент нагружения на длительное растя-



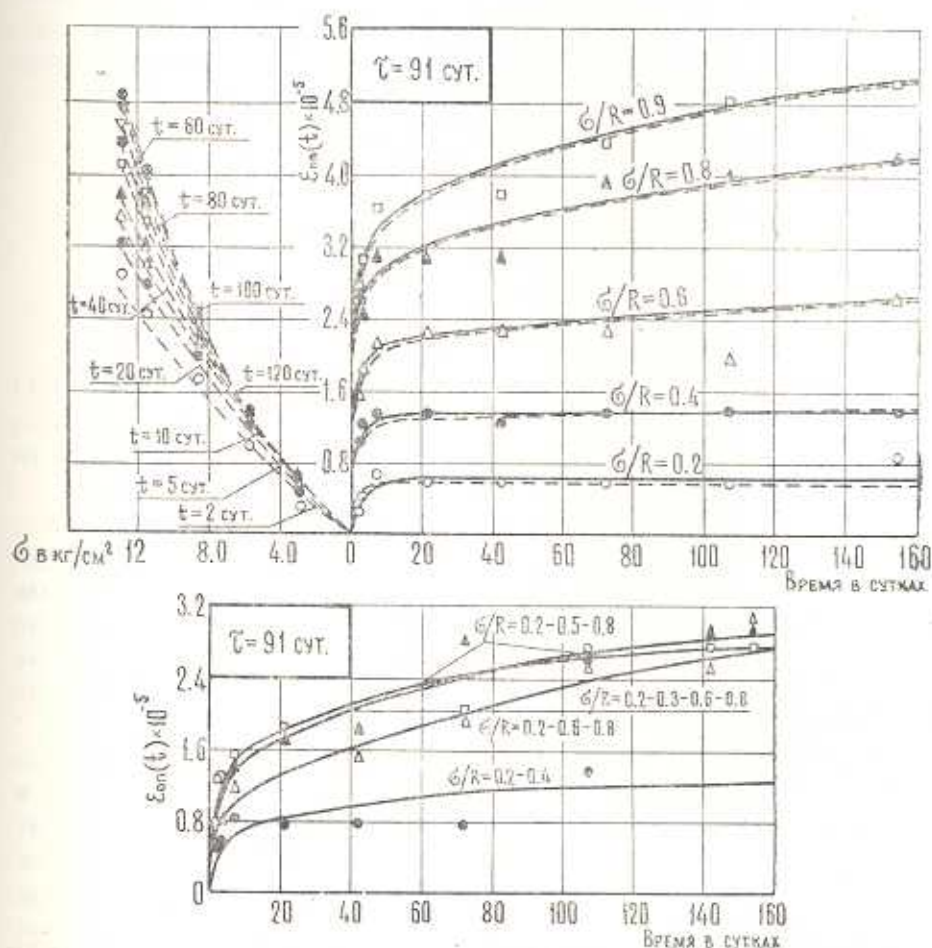
жение (табл. 3). При этом нетрудно заметить, что в этом случае закономерная связь между обратимыми упруго-мгновенными деформациями и ранее действующими напряжениями не наблюдается. По данным же образцов, загруженных в возрасте 91 и 286 сут, степень обратимости упруго-мгновенных деформаций получилась тем больше, чем выше был уровень растягивающего напряжения в момент длительного нагружения. При этом отношение обратимых упруго-мгновенных деформаций к упруго-мгновенным деформациям в зависимости от уровня предшествующего растягивающего напряжения может быть меньше, равно и больше единицы.



Фиг. 1.

Рассматривая верхний график фиг. 1, нетрудно заметить, что обратимость деформаций ползучести образцов, загруженных постоянными напряжениями в возрасте 28 сут, тем больше, чем выше уровень напряжения в момент длительного нагружения. Сказанное в полной мере относится и к тем образцам, которые были загружены в возрасте 91 и 286 сут. Из сравнения же соответствующих кривых обратимых деформаций ползучести, представленных на двух графиках фиг. 1—3, можно заключить, что обратимость деформаций ползучести образцов, загруженных постоянными растягивающими нагрузками, больше образцов, которые загружались ступенчато-возрастающими растягивающими нагрузками. Это явление

связано с тем, что, как уже было показано, длительное растяжение в зависимости от возраста и уровня напряжения в момент длительного нагружения может привести как к повышению прочности и модуля деформации бетона, так и к их снижению. При прочих равных условиях отрицательное влияние длительного растяжения в случае нагружения постоянными нагрузками больше, а положительный эффект меньше, чем при нагружении ступенчато-возрастающими нагрузками. Это обстоятельство и обуславливает то, что во всех случаях благодаря более высокому модулю деформации обратимые деформации после разгрузки образцов, нагруженных ступенчатой нагрузкой, получаются меньше.

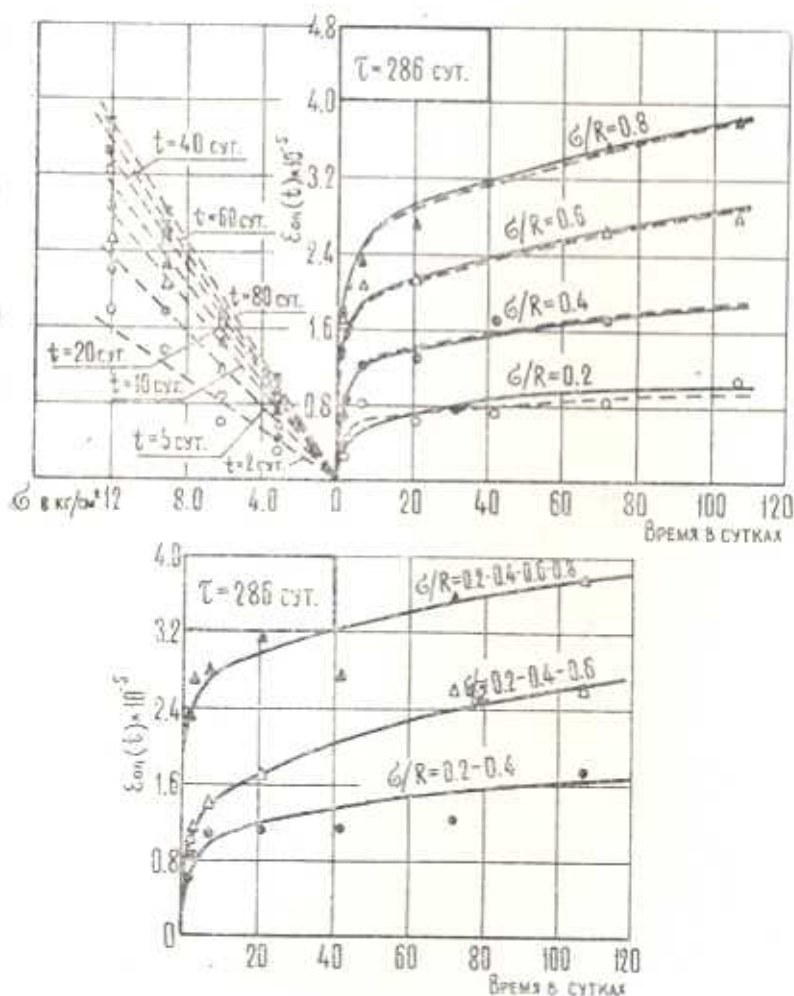


Фиг. 2.

По данным табл. 3 при  $\tau = 28$  сут отношение обратимых деформаций ползучести к деформациям ползучести практически не зависит от уровня предшествующего растягивающего напряжения. Сказанное в полной мере сохраняется и при  $\tau = 91$  сут. Однако, при  $\tau = 286$  сут  $\varepsilon_{об}/\varepsilon_n$  уже существенно зависит от уровня напряжения и чем выше последний, тем относительно меньше обратимые деформации ползучести. Из сравнения отношений



$\varepsilon_{no}/\varepsilon_n$  образцов, загруженных в различном возрасте, можно также заключить, что чем старше бетон к моменту длительного нагружения, тем относительно больше обратимые деформации ползучести бетона после его разгрузки.



Фиг. 3.

Как известно, характеристикой ползучести бетона принято считать отношение деформаций ползучести к соответствующим упруго-мгновенным деформациям в момент длительного нагружения ( $\varphi_t = \varepsilon_n / \varepsilon_y$ ). В табл. 3 нами введено новое понятие характеристики обратимых деформаций ползучести, которая представляет собой отношение обратимых деформаций ползучести к обратимым упруго-мгновенным деформациям ( $\varphi_t^* = \varepsilon_{no} / \varepsilon_{yo}$ ). Из данных табл. 3 следует, что характеристика обратимых деформаций ползучести ( $\varphi_t^*$ ) меньше, чем характеристика ползучести ( $\varphi_t$ ), причем их чувствительная разница при  $\tau = 28$  сут с увеличением  $\tau$  уменьшается. Так, напри-

мер, при уровне напряжения 0.4 и  $\tau = 28$  сут  $\varphi_t/\varphi_t^* = 9$ , а при том же уровне напряжения, но при  $\tau = 286$  сут—1.2.

По данным табл. 3, независимо от возраста к моменту длительного нагружения ( $\tau$ ), характеристика ползучести ( $\varphi_t$ ) бетона при растяжении с увеличением уровня напряжения возрастает. Что касается характеристики обратимых деформаций ползучести, то сказанное сохраняется только при  $\tau = 28$  сут, а при  $\tau = 91$  и 286 сут уже наблюдается обратная картина.

Для описания кривых обратимых деформаций ползучести бетона после разгрузки из-под различных постоянных растягивающих напряжений мы воспользовались зависимостями теории упруго-ползучего тела Н. Х. Арутюняна [4]. В результате описания семейства экспериментальных кривых обратимых деформаций ползучести для  $\tau = 28, 91$  и 286 сут получены следующие зависимости:

$$10^5 \cdot \varepsilon_{\text{об}}(t, 28) = 0.42 [1 - 0.5 (e^{-0.06t} + e^{-0.0078t})] \sigma \quad (1.3)$$

$$10^5 \cdot \varepsilon_{\text{об}}(t, 91) = 0.241 (1 - e^{-0.1t}) \left[ \left( 0.275 + \frac{4.14}{t} \right) \sigma + (0.0235 + 0.0001846) \sigma^2 \right] \quad (1.4)$$

$$10^5 \cdot \varepsilon_{\text{об}}(t, 286) = 0.40 [1 - 0.5 (e^{-0.053t} + e^{-0.008t})] \sigma \quad (1.5)$$

Кривые обратимых деформаций ползучести, построенные по формулам (1.3), (1.4) и (1.5), на фиг. 1—3 представлены пунктиром и, как видим, их расхождение с экспериментальными кривыми в большинстве случаев весьма незначительно.

Из приведенных формул следует, что при  $\tau = 28$  и 286 сут зависимость между обратимыми деформациями ползучести и предшествующими растягивающими напряжениями имеет линейный характер, а при  $\tau = 91$  сут — нелинейный характер. Для  $\tau = 91$  и 286 сут такие зависимости при различных  $t$  на левых частях графиков фиг. 2 и 3 представлены пунктиром и, как видно, отклонение экспериментальных точек от кривых, построенных по этим зависимостям, незначительно.

Механизм обратимости упруго-мгновенных деформаций и деформаций ползучести еще раскрыт недостаточно. По существующим представлениям в момент длительного нагружения бетона сжимающей нагрузкой заполнитель бетона деформируется упруго и по мере увеличения деформаций ползучести цементного камня происходит перераспределение напряжений с цементного камня на заполнитель, в результате чего упругие деформации заполнителя со временем увеличиваются. При разгрузке бетона упруго-деформированный заполнитель стремится восстановить свою первоначальную форму, однако, этому препятствует затвердевший во времени цементный камень и поэтому последний в местах контакта с заполнителем испытывает растягивающие напряжения, которые и приводят к восстановлению деформаций [7]. При этом, благодаря растягивающим напряжениям, в цементном камне образуются и развиваются микротрещины, которые облегчают обратимые деформации упруго-деформированного заполнителя и бетона в целом.

По мнению авторов, немаловажную роль в обратимости деформаций бетона играют и усадочные деформации. Дело в том, что благодаря усадке, еще до момента загрузки бетона в цементном камне в местах контакта с заполнителем образуются усадочные микротрещины, количество и раскрытие которых тем больше, чем больше возраст бетона к моменту загрузки. При разгрузке длительно сжатого бетона наличие микротрещин облегчает обратимость деформаций упруго-деформированного заполнителя и бетона в целом. Причем под воздействием обратимых деформаций заполнителя раскрытие этих микротрещин может возрасти и даже могут образоваться новые микротрещины.

В случае же загрузки бетона длительной растягивающей нагрузкой раскрытие усадочных микротрещин увеличивается и образуются новые микротрещины, которые после разгрузки смыкаются и тем самым облегчают обратимость деформаций упруго-деформированного заполнителя и бетона в целом.

Как уже было показано, чем старше бетон к моменту длительного растяжения, тем относительно больше восстанавливаются деформации ползучести после его разгрузки. Объясняется это тем, что чем старше бетон, тем больше как количество, так и раскрытие микротрещин. Следует также отметить, что обратимость деформаций облегчается и в том случае, когда по разным причинам модуль деформаций бетона во времени снижается. В частности, спад модуля деформации может быть вызван неблагоприятными температурно-влажностными условиями, а также длительным растяжением бетона.

### *Основные выводы*

1. Длительное нагружение как постоянными, так и ступенчато-возрастающими растягивающими напряжениями в зависимости от уровня напряжения и возраста к моменту приложения нагрузки может привести как к повышению, так и к снижению прочности и модуля деформации бетона при растяжении.

2. При разгрузке длительно растянутого бетона упруго-мгновенные деформации относительно больше восстанавливаются, чем деформации ползучести. Обратимость деформаций длительно растянутого бетона зависит от возраста бетона к моменту длительного нагружения, уровня напряжения, режима нагружения и др.

3. С увеличением возраста бетона процент обратимости как упруго-мгновенных деформаций, так и деформаций ползучести увеличивается.

4. Влияние уровня растягивающего напряжения в момент нагружения на обратимость деформаций ползучести тесно связано с возрастом бетона. При  $t=91$  сут степень обратимости деформаций ползучести не зависит от уровня напряжения, а при более старом возрасте чем больше уровень напряжения, тем меньше процент обратимости деформаций ползучести.

5. Обратимость деформаций ползучести зависит от режима нагружения бетона на длительное растяжение. После предшествующего длительного растяжения ступенчато-возрастающей нагрузкой обратимые деформа-



ции ползучести меньше, чем после предшествующего длительного растяжения постоянной нагрузкой, величина которой равна конечному значению ступенчатой нагрузки.

6. Характеристика обратимых деформаций ползучести  $\varphi_i^*$  существенно меньше, чем характеристика ползучести бетона  $\varphi_i$ . С увеличением возраста бетона к моменту длительного растяжения разница  $\varphi_i^*$  и  $\varphi_i$  уменьшается.

7. Влияние уровня предшествующего растягивающего напряжения на характеристику обратимых деформаций ползучести бетона существенно зависит от возраста к моменту длительного растяжения. При  $\tau = 28$  сут с увеличением уровня напряжения  $\varphi_i^*$  увеличивается, а при  $\tau \geq 91$  сут уменьшается.

Институт механики  
АН Армянской ССР

Поступила 8 VII 1976

Կ. Ս. ԿՐԻՍՏՅԱՆ, Ռ. Ա. ԿՈՏԻԿՅԱՆ, Ռ. Մ. ԱՂԱԶԱՆՅԱՆ

#### ԵՐԿԱՐԱՏԵՎ ԶԳՎԱՅ ԲԵՏՈՆԻ ՀԱԿԱԳԱՐՁԵԼԻ ԳԵՖՈՐՄԱՑԻՍՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ ԲԵՌՆԱԹԱՓՈՒՄԻՅ ՀԵՏՈ

##### Ա մ փ ո փ ո Վ մ

Աշխատանքը նվիրված է երկարատև ձգված բետոնի առաձգա-ակնթարթային և սողքի վերականգնման դեֆորմացիաների էքսպերիմենտալ հետազոտմանը կախված բետոնի հասակից և բեռնավորման մոմենտի հարաբերական լարումներից: Հետազոտությունները ցույց են տվել, որ երկարատև ձգված բետոնի առաձգա-ակնթարթային դեֆորմացիաները համեմատաբար ավելի շատ են վերականգնվում, քան սողքի դեֆորմացիաները:

Հասակի մեծացման հետ առաձգա-ակնթարթային և սողքի վերականգնման դեֆորմացիաները փոքրանում են:

Սողքի վերականգնման դեֆորմացիաները կախված են բետոնի երկարատև բեռով բեռնավորման սեփմից: Աստիճանային աճող ձող բեռով բեռնավորվելիս, սողքի վերականգնման դեֆորմացիաները ավելի փոքր են, քան հաստատուն ձող բեռով բեռնավորվելու դեպքում: Վերականգնման սողքի դեֆորմացիաների բնութագիրը  $\varphi_i^*$ -ն էապես փոքր է սողքի դեֆորմացիաների բնութագրից՝  $\varphi_i$ -ից: Հարաբերական լարումների ազդեցությունը սողքի վերականգնվող դեֆորմացիաների բնութագրի վրա էապես կախված է բեռնավորման մոմենտում բետոնի հասակից:  $\tau = 28$  օրի դեպքում հարաբերական լարումների մեծացման հետ  $\varphi_i^*$ -ն փոքրանում է, իսկ երբ  $\tau \geq 91$  օրից՝ մեծանում է:

# INVESTIGATION OF REVERSIBLE STRAINS IN PROTRACTEDLY TENSILE-STRESSED CONCRETE SUBSEQUENT TO ITS UNLOADING

K. S. KARAPETIAN, R. A. KOTIKIAN, R. M. AGADJANJAN

## S u m m a r y

The paper is devoted to the investigation of reversible elastoinstantaneous strains ( $\varepsilon_{yo}$ ) and creep strains ( $\varepsilon_{co}$ ) in protractedly tensile-stressed concrete, depending on its age ( $\tau$ ) and stress level ( $\sigma R_p$ ) at the instant of protracted loading.

The results obtained show that after concrete unloading the elastoinstantaneous strains are recovered to a relatively greater degree than those of creep. The greater the age of concrete by the instant of protracted loading, the higher reversibility percentage of both  $\varepsilon_{yo}$  and  $\varepsilon_{co}$ .

The characteristics of reversible creep strains,  $\varphi_r^*$ , are substantially below those of concrete creep. As  $\tau$  increases, the difference between  $\varphi_r^*$  and  $\varphi_t$  decreases.

The influence of the preceding tensile stress level upon  $\varphi_r^*$  depends significantly on  $\tau$ . At  $\tau = 28$  days, the higher the stress, the larger  $\varphi_r^*$ , and at  $\tau \geq 91$  days it decreases.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Арутюнян Н. Х. Некоторые вопросы теории ползучести. М.—Л., Гостехиздат, 1932.
2. Карпетян К. С. Влияние длительного сжатия на прочность и деформативность бетона. Изв. АН АрмССР, сер. физ.-мат. наук, 1964, т. 12, № 6.
3. Карпетян К. С. О влиянии длительного нагружения на прочность и деформативность бетона. Докл. АН АрмССР, 1970, т. 51, № 2.
4. Котикян Р. А. Ползучесть бетона при постоянных и ступенчато-возрастающих растягивающих напряжениях. Изв. АН АрмССР, Механика, 1973, т. 26, № 1.
5. Карпетян К. С., Котикян Р. А. Влияние длительного растяжения на прочность и деформативность бетона. Известия АН АрмССР, Механика, 1971, т. 24, № 6.
6. Карпетян К. С., Котикян Р. А. Влияние длительного растяжения на прочность и деформативность бетона в зависимости от масштабного фактора. Сб. научных трудов «Проблемы ползучести и усадки бетона», ЦНИИС Минтрансстроя СССР, М., 1974, вып. 77.
7. Карпетян К. С., Котикян Р. А., Шилладжян Р. М. Исследование обратимости деформаций после разгрузки длительно обжатого бетона. «Проблемы ползучести и усадки бетона», НИИЖБ Госстроя СССР, Ин-т механики АН АрмССР, МИСИ, Ереван, 1974.
8. Митропольский А. К. Техника статистического вычисления. М., 1961.