

К. С. КАРАПЕТЯН, Р. А. КОТИКЯН

ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО РАСТЯЖЕНИЯ НА  
ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ БЕТОНА

В процессе длительного нагружения бетона, вследствие развивающихся деформаций ползучести, изменяются прочность и деформативные свойства бетона. Из немногочисленных опытов известно, что в зависимости от различных факторов длительное нагружение может привести как к увеличению прочности и модуля деформации бетона, так и к их падению.

Вопрос о том, как влияет длительное растяжение на прочность и деформативность бетона, до сих пор мало исследован. Исследования А. В. Саталкина и Б. А. Сенченко [1] показали, что при определенных условиях длительное растяжение бетона в раннем возрасте может привести к увеличению его прочности на растяжение. То же самое известно и из опытов Ф. А. Абасова [1].

Влияние длительного растяжения на прочность и деформативность бетона изучалось также одним из авторов настоящей статьи. Исследования позволили установить, что влияние длительного растяжения помимо величины напряжения в процессе длительного нагружения, в большой мере зависит и от направления растягивающей нагрузки по отношению к слоям бетонирования. Благодаря длительному растяжению влияние анизотропии на прочность и деформации бетона уменьшается [2].

Настоящая работа посвящена исследованию влияния длительного растяжения на прочность и деформативность бетона в зависимости от величины напряжения и возраста бетона к моменту нагружения.

## Методика исследования

Для исследования влияния длительного растяжения на прочность и деформативность бетона были использованы образцы из большой серии опытов по изучению зависимости между напряжениями и деформациями ползучести при растяжении с учетом старения бетона.

Опыты были поставлены на больших восьмерках сечением 10·10 см, высотой 60 см, изготовленные из тяжелого бетона состава 1:1, 81:2, 19 (по весу),  $V/C = 0.485$ . Материалами для приготовления бетона являлись базальтовый щебень, кварцевый песок и шлакопортландцемент марки 600.

Всего было приготовлено шесть замесов бетона и из каждого изготовлено по 20 восьмерок и необходимое количество кубиков с ребром 10 см. Восьмерки бетонировались в горизонтальном положении. Приготовление бетона производилось вручную, а уплотнение на вибро-

площадке—при продолжительности вибрации 30 сек. Образцы освобождались от форм через 48 час и далее находились в обычных лабораторных условиях.

На длительное растяжение образцы загружались в возрасте бетона: 3; 7; 14; 27; 84 и 280 сут. при относительных напряжениях: 0.2; 0.4; 0.6; 0.7 и 0.8 в каждом возрасте. Как правило, все образцы, загружаемые в одном возрасте, принадлежали одному замесу бетона. После разгрузки образцов и измерения их обратимых деформаций все они были испытаны под кратковременной растягивающей нагрузкой до разрушения. Одновременно испытывались и те образцы, на которых определялись усадочные деформации. Испытание образцов производилось ступеньчатым повышением нагрузки и измерением деформаций до момента разрушения. Испытание каждого образца длилось не более 3-х минут.

### Влияние длительного растяжения на прочность бетона при растяжении

В табл. 1 приведены прочностные показатели испытанных образцов. Как видно из данных табл. 1, длительное растяжение привело к понижению прочности тех образцов, которые были загружены на длительное растяжение в возрасте 3 и 7 сут. Падение прочности тем чувствительнее, чем моложе бетон и больше относительное напряжение в момент длительного нагружения.

Таблица 1

Влияние длительного растяжения на прочность бетона при растяжении

Возраст бетона в моменту длительного нагружения в сут.	Прочность бетона в момент длительного нагружения $\text{кг/см}^2$		Длительность нагружения в сут.	Возраст бетона в моменту испытания на разрыв в сут.	Прочность бетона на растяжение в $\text{кг/см}^2$ , когда относительное напряжение в момент длительного нагружения составляет					
	$R_k$	$R_p$			0	0.2	0.4	0.6	0.7	0.8
3	117	7.7	537	639	12.4	12.4	12.7	11.5	11.0	8.8
					1.00	1.00	1.02	0.92	0.88	0.71
7	180	8.7	557	664	14.9	14.2	14.6	13.2	11.8	12.7
					1.00	0.95	0.98	0.89	0.79	0.86
14	230	10.6	547	662	14.6	14.4	14.4	14.4	13.3	14.1
					1.0	0.99	0.99	0.99	0.91	0.97
27	258	14.2	539	664	13.7	13.7	14.3	12.2	13.2	—
					1.00	1.00	1.04	0.89	0.96	—
84	283	14.4	477	659	15.4	15.5	15.7	15.9	15.6	14.6
					1.00	1.01	1.02	1.03	1.01	0.95
280	308	12.3	280	658	13.4	13.0	13.5	12.0	14.1	13.9
					1.00	0.97	1.01	0.90	1.05	1.04

По данным испытаний образцов, загруженных в возрасте бетона 14; 27; 84 и 280 сут. длительное растяжение уже практически не оказывает влияния на прочность бетона.

### Влияние длительного растяжения на последующие деформации бетона под кратковременной растягивающей нагрузкой

Экспериментальные данные деформаций бетонных восьмерок под кратковременной растягивающей нагрузкой подвергались статистической обработке по методике [3], позволяющей одновременно учитывать все точки каждой экспериментальной кривой.

Экспериментальные кривые аппроксимировались по корреляционному уравнению

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

Между обратимыми значениями величин  $\varepsilon$  и  $\sigma/R_p$  этого уравнения существует линейная зависимость, что намного облегчило вычисление значений параметров  $a$  и  $b$ .

Для оценки линейности корреляционных уравнений вычислялся критерий  $\zeta = 1 - r_{1,1}^2$  и его основная ошибка  $\sigma_\zeta = \sqrt{\zeta/n}$ , где  $r_{1,1}$  — коэффициент корреляции,  $n$  — число точек экспериментальной кривой. Связь между двумя статистическими величинами можно полагать линейной, если выполняется неравенство [3]

$$\zeta/\sigma_\zeta < 3 \quad (2)$$

Данные табл. 2 показывают, что корреляция между обратными значениями деформаций бетона и относительным напряжением является существенно линейной для всех возрастов и длительно действующих нагрузок.

В табл. 3 приведены деформации бетонных восьмерок под кратковременной растягивающей нагрузкой (при  $P = 800 \text{ кг}$ ) и данные их статистической обработки. Как видим, показатель точности экспериментов в большинстве случаев не превышает  $5-7\%$ , что говорит о хорошей точности экспериментов.

На фиг. 1 для каждого возраста бетона  $\tau$  на отдельном графике представлено семейство кривых кратковременных деформаций при растяжении тех образцов, которые ранее испытывали разные постоянные растягивающие напряжения в процессе длительного нагружения, а также для сравнения — кривая деформаций усадочных образцов. Кривые деформаций рассчитаны по выражению (1) с использованием значений параметров  $a$  и  $b$  (табл. 2).

Исследования К.С. Карапетяна [4] показали, что, когда в процессе длительного сжатия бетон претерпевает линейную или скоропроходящую нелинейную ползучесть, то независимо от возраста бетона в момент длительного нагружения последующие деформации бетона под кратковременной сжимающей нагрузкой уменьшаются.

При нелинейной ползучести, когда нелинейность деформаций ползучести во времени увеличивается, последующие деформации бетона под кратковременной сжимающей нагрузкой увеличиваются и одновременно изменяется характер их зависимости от напряжений.

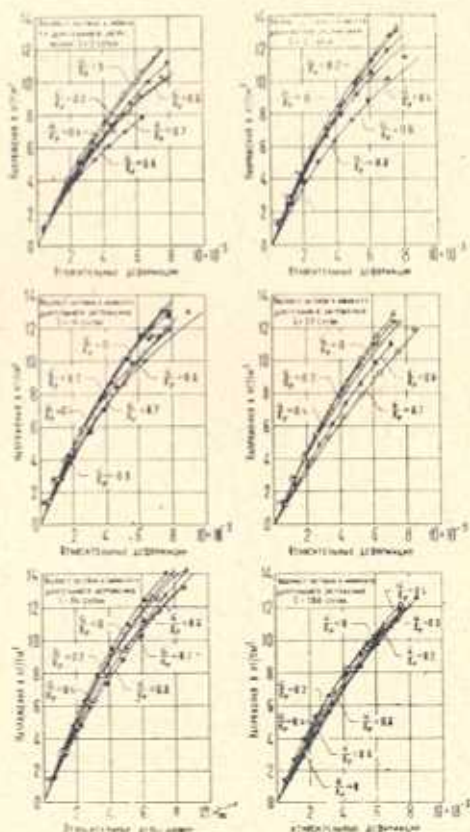
Таблица 2

Возраст бетона в момент длительного нагружения в сут.	Относительное напряжение в момент длительного нагружения	Число экспериментальных точек	Параметры корреляционного уравнения		Коэффициент корреляции	$\frac{\sigma}{\sigma_0}$
			a	b		
3	0	36	5.26	0.42	0.995	0.30
	0.2	36	4.33	0.37	0.999	0.11
	0.4	18	5.92	0.36	0.999	0.11
	0.6	36	5.70	0.31	0.997	0.23
	0.7	54	5.25	0.48	—	—
	0.8	18	4.04	0.48	—	—
7	0	36	5.27	0.43	0.996	0.25
	0.2	36	5.29	0.44	0.997	0.23
	0.4	54	5.81	0.35	1.000	0.00
	0.6	54	4.96	0.46	0.992	0.36
	0.8	54	5.81	0.46	0.981	0.58
14	0	36	5.81	0.35	1.00	0.00
	0.2	36	5.20	0.43	—	—
	0.4	54	5.40	0.38	—	—
	0.6	54	5.80	0.52	0.998	0.10
	0.7	54	4.61	0.54	—	—
	0.8	36	6.34	0.35	0.995	0.30
27	0	36	5.63	0.38	—	—
	0.2	36	5.31	0.38	0.999	0.11
	0.4	36	5.66	0.35	—	—
	0.6	54	6.05	0.27	—	—
	0.7	36	7.45	0.26	—	—
84	0	36	4.35	0.44	—	—
	0.2	36	4.93	0.45	—	—
	0.4	54	5.55	0.41	—	—
	0.6	54	6.30	0.40	0.996	0.27
	0.7	36	5.88	0.47	0.997	0.23
	0.8	36	5.82	0.42	—	—
280	0	18	5.78	0.38	1.00	0.00
	0.2	36	4.73	0.49	1.00	0.00
	0.4	54	5.70	0.36	—	—
	0.6	54	5.61	0.28	0.997	0.23
	0.7	36	6.34	0.35	1.000	0.00
	0.8	18	6.74	0.31	0.999	0.11

Таким образом, влияние длительного сжатия на последующие деформации бетона тесно связано с ползучестью, которая в зависимости от величины напряжения и возраста бетона к моменту нагружения может быть линейной и нелинейной.

Нет сомнения, что и влияние длительного растяжения на деформации бетона также связано с явлением ползучести.

На фиг. 1 обращает на себя внимание то обстоятельство, что длительное растяжение бетона даже в зрелом возрасте относительно высокими уровнями напряжений не приводит к изменению характера кривых деформаций, как это имеет место при длительном сжатии [4].



Фиг. 3.

С другой стороны, если длительное сжатие бетона в раннем возрасте приводит к уменьшению ее последующих деформаций под кратковременной сжимающей нагрузкой, то, как следует из верхних двух графиков фиг.1, длительное растяжение, наоборот, приводит к увеличению растяжимости бетона. На этих графиках ( $\tau = 3$  и 7 сут.) все кривые деформаций длительно растянутых образцов расположились ниже кривой деформаций усадочных образцов, и деформации бетона получались тем больше, чем больше было относительное напряжение в момент длительного нагружения.

Рассматривая остальные четыре графика фиг. 1 ( $\tau = 14; 27; 84$  и 280 сут.), нетрудно заметить, что на этих графиках кривая деформаций длительно растянутых образцов, для которых  $\sigma/R_p = 0.2$ , легла

Таблица 3

Данные статической обработки экспериментов

Возраст бетона к моменту длительного нагружения $\tau$ в сут.	Относительное напряжение в момент длительного нагружения	Число измерений	Относительные деформации при $P=800$ кг $\epsilon_{cp} \cdot 10^3$	Среднее квадратичное отклонение	Коэффициент вариации $v$ %	Показатель точности $o$ ' <sup>9</sup>
3	0	4	4.22	0.6952	16.36	8.2
	0.2	4	4.97	0.6185	12.43	6.2
	0.4	4	4.40	0.4545	10.33	5.2
	0.6	4	5.22	1.4805	28.33	14.2
	0.7	6	5.28	1.2460	23.93	9.8
	0.8	2	6.50	0.7075	10.88	7.7
7	0	4	3.55	0.3700	10.42	5.2
	0.2	4	4.17	0.6655	15.93	7.7
	0.4	6	4.05	0.5090	12.57	5.1
	0.6	6	4.30	0.8365	19.45	7.2
	0.8	6	5.10	0.5750	11.57	4.7
14	0	4	4.00	0.1663	4.16	2.1
	0.2	4	3.85	0.3870	10.05	5.2
	0.4	6	3.93	1.1250	28.60	11.7
	0.6	6	4.87	0.4320	8.87	3.6
	0.7	4	4.10	0.0200	4.88	2.4
	0.8	4	4.35	0.6450	14.80	7.4
27	0	4	3.93	0.1500	3.82	1.9
	0.2	4	3.83	0.3860	10.07	5.0
	0.4	4	4.03	0.3200	7.97	4.0
	0.6	6	4.77	0.4590	9.62	3.9
	0.7	4	5.58	1.7290	30.80	15.5
84	0	4	3.65	0.4020	11.01	5.5
	0.2	4	3.32	0.4110	12.40	6.2
	0.4	6	3.53	0.3333	9.43	—
	0.6	6	3.90	0.2830	7.26	3.0
	0.7	4	4.15	0.0580	1.40	0.7
	0.8	4	4.25	0.9815	23.1	11.6
280	0	2	4.65	0.4990	10.64	7.5
	0.2	4	4.17	0.4180	10.04	5.0
	0.4	6	4.20	0.7320	17.42	7.1
	0.6	6	4.61	0.3333	7.16	2.9
	0.7	4	4.47	0.4990	11.16	5.6
	0.8	2	4.70	0.5500	11.70	8.3

выше кривой деформаций усадочных образцов, а все остальные кривые, соответствующие  $\sigma/R_p = 0.4; 0.6; 0.7$  и  $0.8$  — ниже.

Таким образом, при  $\tau = 14$  сут., если в момент длительного нагружения  $\sigma/R_p \leq 0.2$ , то длительное растяжение приводит к повышению модуля деформации бетона, а с дальнейшим повышением  $\sigma/R_p$  имеет место обратное явление (табл. 4).

Таблица 4

Влияние длительного растяжения на модуль деформации бетона

Возраст бетона к моменту длительного нагружения в сут.	Относительное напряжение в момент длительного нагружения	Модуль деформации бетона по касательной в $T/cm^2$ , когда относительное напряжение при кратковременном растяжении составляет				Модуль деформации образцов, подвергнутых длительному растяжению в $\sigma/\sigma_0$ от модуля деформаций усадочных образцов, когда относительное напряжение при кратковр. растяжении составляет			
		0	0.25	0.50	0.75	0	0.25	0.50	0.75
		3	0	260	212	168	129	100	100
	0.2	209	173	141	111	80	82	84	85
	0.4	223	190	159	131	86	90	95	102
	0.6	241	182	132	90	93	86	79	69
	0.7	225	174	130	92	87	82	77	71
	0.8	218	169	126	89	84	79	75	69
7	0	282	225	174	122	100	100	100	100
	0.2	267	211	162	120	95	94	93	98
	0.4	251	209	171	137	89	93	98	112
	0.6	266	208	158	114	94	92	91	93
	0.8	210	172	130	94	78	76	75	77
14	0	251	209	171	137	100	100	100	100
	0.2	276	220	170	127	110	105	99	93
	0.4	267	219	175	136	106	105	102	99
	0.6	248	188	136	92	99	90	80	67
	0.7	289	216	154	102	115	103	90	74
	0.8	223	186	152	121	89	89	89	88
27	0	243	199	179	124	100	100	100	100
	0.2	258	211	190	132	106	106	106	106
	0.4	255	212	174	139	105	107	97	112
	0.6	202	176	151	129	83	88	84	103
	0.7	177	155	134	115	73	78	75	93
84	0	288	175	129	100	100	100	100	100
	0.2	314	247	189	138	109	108	108	107
	0.4	283	228	179	136	98	100	102	105
	0.6	252	204	161	123	88	89	92	95
	0.7	265	206	155	111	92	90	89	86
	0.8	251	201	157	118	87	88	90	91
280	0	232	190	152	119	100	100	100	100
	0.2	275	212	157	110	118	111	103	106
	0.4	237	196	159	126	102	103	104	106
	0.6	214	185	158	134	92	97	104	113
	0.7	222	185	151	121	96	97	99	102
	0.8	206	175	147	121	89	81	97	102

## В ы в о д ы

1. Влияние длительного растяжения на прочность бетона на растяжение в большой мере зависит от возраста бетона  $\tau$  и относительного напряжения  $\sigma/R_p$  в момент длительного нагружения. Если бетон подвергается длительному растяжению в молодом возрасте  $\tau \leq 7$  сут., то прочность бетона понижается и притом тем чувствительнее, чем моложе бетон и больше  $\sigma/R_p$  в момент длительного нагружения. При  $\tau = 3$  сут. и  $\sigma/R_p = 0.8$  понижение прочности на растяжение составляет 28%.

С дальнейшим увеличением возраста бетона  $\tau \leq 14$  сут. длительное растяжение практически не оказывает влияния на прочность бетона.

2. Влияние длительного растяжения на последующие деформации бетона под кратковременной растягивающей нагрузкой также в большой мере зависит от возраста бетона и относительного напряжения в момент длительного загрузения. В случае загрузения в молодом возрасте ( $\tau > 7$  сут.) длительное растяжение приводит к уменьшению модуля деформации бетона. При  $\tau = 3$  сут. и  $\sigma/R_p = 0.8$  уменьшение модуля деформации составляет до 30%.

Если же  $\tau > 14$  сут, то при  $\sigma/R_p = 0.2$  длительное растяжение приводит к некоторому повышению модуля деформации бетона, а при  $\sigma/R_p > 0.4$  имеет место обратное явление.

Институт математики и механики  
АН Армянской ССР

Поступила 22 IX 1970

Կ. Ս. ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ, Ռ. Ա. ԿՈՏԻԿՅԱՆ

ԵՐԿԱՐԱՍՏԻՎ ԶՊՄԱՆ ԱԶԳԵՅՈՒԹՅՈՒՆԸ ԲԵՏՈՆԻ ԱՄՐՈՒԹՅԱՆ ԵՎ  
ԴԵՖՈՐՄԱՍԻՎ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՎՐԱ

### Ա մ փ ո փ ո լ մ

Աշխատանքը նվիրված է բետոնի ամրության և ղեֆորմատիվ հատկությունների վրա երկարատև ձգման ազդեցության հետազոտությանը կախված լարումների մեծություններից և բևնավորման մոմենտում բետոնի հասակից:

Ուսումնասիրությունները ցույց են տվել, որ երկարատև ձգման ազդեցությունը բետոնի ամրության և ղեֆորմատիվ հատկությունների վրա մեծապես կախված է բևնավորման մոմենտում բետոնի հասակից և հարաբերական լարումների մեծություններից: Փոքր հասակների ղեպրում ( $\tau \leq 7$  օր) բետոնի ձգման ամրությունը և ղեֆորմացիաների մոդուլը հարաբերական լարումների մեծացման հետ փոքրանում են: Երբ  $\tau = 3$  օր և  $\sigma/R_p = 0.8$  ամրության անկումը կազմում է 28%, իսկ ղեֆորմացիաների մոդուլինը՝ մինչև 30%:

Հասակի հետագա մեծացումը գործնականորեն չի ազդում բետոնի ամրության վրա:

Երբ  $\tau \geq 14$  օր և  $\sigma/R_p = 0.2$ , ապա երկարատև ձգումը բերում է ղեֆորմացիաների մոդուլի որոշ մեծացման, իսկ երբ  $\frac{\sigma}{R_p} > 0.4$ , տեղի ունի հակառակ էրևույթը:



## THE EFFECT OF CONTINUOUS TENSION ON DURABILITY AND DEFORMATION OF CONCRETE

K. S. KARAPETIAN, R. A. KOTIKIAN

## S u m m a r y

The paper deals with the effect of continuous tension on durability and deformation of concrete depending on the age and value of stress. The investigation shows that the effect of continuous tension on the durability and deformation of concrete depends largely upon the age at the moment of loading and on the strength of relative stresses. At small ages ( $\tau \geq 7$  days) the durability of concrete and module of deformation decrease with the increase in relative stresses. When  $\tau = 3$  days and  $\tau/R_p = 0.8$  the decrease in durability is 28%, while the module of deformation is 30%.

Subsequent increase in age has practically no effect upon the durability of concrete.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Саталкин А. В., Сенченко Б. А. Раннее нагружение бетона и железобетона в мостостроении. Автотрансиздат, М., 1956.
2. Карапетян К. С. О влиянии длительного нагружения на прочность и деформативность бетона. Докл. АН АрмССР, т. LI, № 2, 1970.
3. Митропольский А. К. Техника статистического вычисления. М., 1961.
4. Карапетян К. С. Влияние длительного сжатия на прочность и деформативность бетона. Изв. АН АрмССР, сер. физ.-мат. наук, т. 12, № 6, 1964.