

К. С. КАРАПЕТЯН, Р. А. КОТИКЯН

## ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНЫХ ПОСТОЯННЫХ И СТУПЕНЧАТО-ВОЗРАСТАЮЩИХ СЖИМАЮЩИХ НАГРУЗОК НА ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ БЕТОНА

Из опытов [1—5] известно, что длительное загрузеие может оказать как положительное, так и отрицательное влияние на физико-механические свойства бетона. В связи с этим глубокое всестороннее исследование этого вопроса для возможности учета при проектировании бетонных и железобетонных конструкций приобретает все более актуальное значение.

Как показали исследования [1—3], влияние длительного сжатия, растяжения и кручения на физико-механические свойства бетона тесно связано с явлением ползучести бетона. А так как ползучесть бетона зависит от большого количества факторов, то и влияние длительного загрузеия на физико-механические свойства бетона необходимо изучать в зависимости от этих факторов.

В данной работе приводятся результаты исследования влияния длительного сжатия на прочность и деформативность бетона при сжатии в зависимости от уровня напряжения и возраста бетона в момент длительного загрузеия. В ней впервые рассматривается влияние как длительных постоянных, так и ступенчато-возрастающих сжимающих нагрузок на прочность и деформативность бетона.

Для исследования влияния длительного сжатия на прочность и деформативность бетона были использованы образцы большой серии опытов по изучению ползучести бетона при постоянных и ступенчато-возрастающих сжимающих напряжениях в зависимости от возраста бетона ( $\tau$ ) в момент загрузеия.

Испытанию подвергались цилиндрические образцы диаметром 10 см, высотой 60 см, изготовленные из вибрированного тяжелого бетона состава 1:5.04:4.10 (по весу) с  $V/\Omega=0.98$ . Мелким и крупным заполнителями бетона являлись кварцевый песок и базальтовый щебень. В качестве вяжущего был применен портландцемент марки 400.

Всего было приготовлено три замеса бетона и изготовлено 135 цилиндрических образцов, а также необходимое количество кубиков размером ребра 10 см. Образцы освобождались от форм через двое суток и далее находились во влажных условиях, где температура воздуха  $T = 23 \pm 4^\circ\text{C}$ , а влажность  $P = 92 \pm 5\%$ .

Образцы подвергались длительному загрузению в возрасте бетона 15, 29, 185 и 375 сут. Необходимые данные об опытных образцах приведены в табл. 1.

Данные об опытных образцах

Таблица 1

$\tau$ в сут	$R_{II}$ в кг/см <sup>2</sup>	$\frac{\sigma}{R_{II}}$	$\tau$ в кг/см <sup>2</sup>	Количество образцов
15	97	0	0	3
		0.2	19.4	3
		0.4	38.8	3
		0.5	48.5	3
		0.6	58.2	3
		0.7	67.9	3
		0.8	77.6	4
		0.2-0.4 0.2-0.4-0.6 0.2-0.4-0.6-0.8	19.4-38.8 19.4-38.8-58.2 19.4-38.8-58.2-77.6	3 4 5
29	132	0	0	3
		0.2	26.4	3
		0.4	52.8	3
		0.5	66.0	3
		0.6	79.2	3
		0.7	92.4	3
		0.2-0.4 0.2-0.4-0.6 0.2-0.4-0.6-0.7	26.4-52.8 26.4-52.8-79.2 26.4-52.8-79.2-92.4	3 3 3
		185	185	0
0.2	37.0			3
0.4	74.0			3
0.6	111.0			3
0.2-0.4 0.2-0.4-0.6	37.0-74.0 37.0-74.0-111.0			6 6
376	192			0
		0.2	38.4	3
		0.4	76.8	3
		0.5	96.0	3
		0.2-0.4 0.2-0.4-0.5	38.4-76.8 38.4-76.8-96.0	3 3

Примечание: После первых ступеней ступенчатых нагрузок загрузение образцов последующими ступенями производилось при  $\tau = 15$  и 29 сут. через каждые 10 сут., а при  $\tau = 185$  и 376 сут.—через 15 и 16 сут. соответственно.

После разгрузки и наблюдений за обратимыми деформациями все образцы были испытаны под кратковременной сжимающей нагрузкой до разрушения. Испытание образцов производилось ступенчатым повышением нагрузки и выдержкой под каждой ступенью нагрузки лишь

на время, необходимое для взятия отсчетов по микронным индикаторам, измеряющим деформации.

В табл. 2 приведены прочности всех испытанных образцов. Рассматривая данные, относящиеся к каждому возрасту, мы видим, что прочность образцов, которые были подвергнуты длительному сжатию разными постоянными и ступенчато-возрастающими нагрузками, практически не отличается от прочности контрольных (усадочных) образцов.

Отсутствие влияния длительного сжатия на прочность бетона ранее отмечалось в работе [1], где образцы были загружены в возрастах 7, 14, 29, 95, 185, 365 сут. и максимальный уровень напряжения в большинстве случаев достигал значения 0.95. Наряду с этим в этих опытах наблюдалось существенное влияние длительного сжатия на последующие деформации бетона под кратковременной сжимающей нагрузкой. Деформации образцов, которые претерпевали линейную или скоропроходящую нелинейную ползучесть, в результате длительного сжатия уменьшались. Что касается образцов, которые претерпевали нелинейную ползучесть, то в этом случае наблюдалось обратное явление, и одновременно длительное сжатие приводило к изменению характера кривых деформаций.

В исследованиях Р. Лермита [4], Н. И. Катина [5] и др. также не было обнаружено заметного изменения прочности бетона в результате длительного сжатия.

По существующим немногочисленным опытными данным длительная прочность бетона  $R_{22} = 0.8-0.9 R$ . Однако, тот факт, что в обширных опытах [1] длительное обжатие даже с относительным уровнем напряжения 0.95 не привело к разрушению бетона, свидетельствует о том, что  $R_{22}$  может быть и больше 0.9  $R$ . Важным и определяющим фактором длительной прочности бетона является интенсивность роста прочности бетона во времени после его длительного нагружения.

Все опытные данные деформаций при кратковременных испытаниях бетонных образцов подвергались статистической обработке, и экспериментальные кривые описывались корреляционным уравнением

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

Значения опытных параметров  $a$  и  $b$  определялись приведением данного уравнения к линейному, учитывая, что между обратными значениями  $\varepsilon$  и  $\sigma / R_u$  существует линейная зависимость.

Линейность корреляционного уравнения оценивалась по методике [6] и было установлено, что корреляция между обратными значениями  $\varepsilon$  и  $\sigma / R_u$  является существенно линейной для всех возрастов и длительно действующих нагрузок.

Таблица 2

Влияние длительного сжатия на цилиндрическую прочность бетона

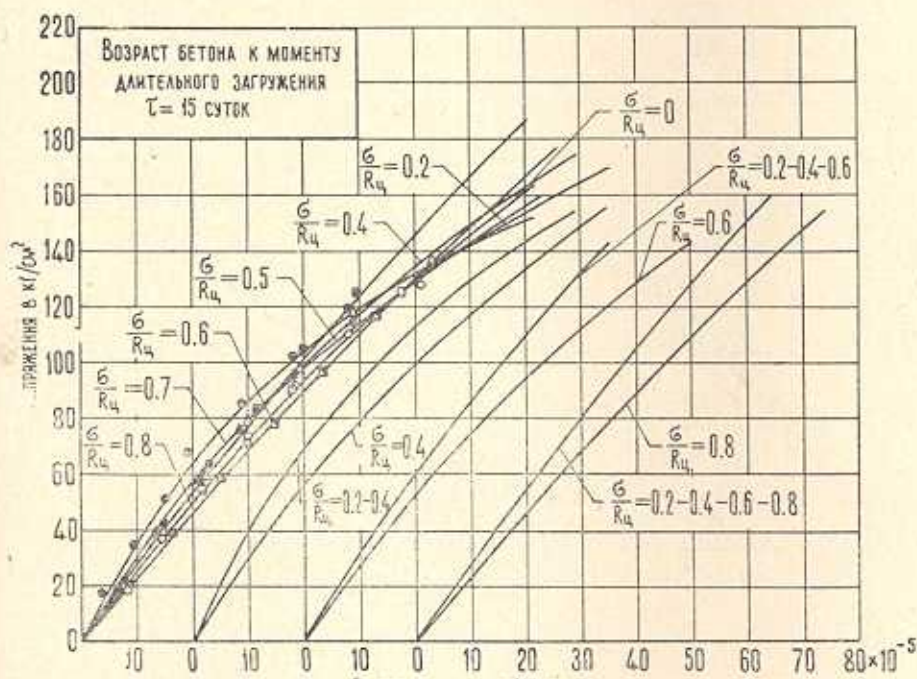
$\tau$ в сут	Продолжительность приложения нагрузки, в сут	Возраст бетона к моменту испытания до разрушения, в сут	Цилиндрическая прочность бетона в кг/см <sup>2</sup> при $\tau/R_d$												
			В случае загрузки постоянными нагрузками					В случае загрузки ступенчатыми нагрузками							
			0	0.2	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.2 ÷ 0.4	0.2 ÷ 0.5	0.2 ÷ 0.6	0.2 ÷ 0.7	0.2 ÷ 0.8	
15	167	182	182	170	194	189	178	208	193	192	178	—	—	—	199
				0.93	1.07	1.04	0.98	1.14	1.06	1.06	0.98	—	—	—	1.09
29	210	321		195	200	218	229	207	—	226	209	—	—	—	—
				0.96	0.99	1.08	1.13	1.02	—	1.11	1.03	—	—	—	—
185	414	1019		200	214	—	216	—	—	206	219	—	—	—	—
				1.00	1.08	—	1.09	—	—	1.04	1.10	—	—	—	—
376	648	1506		199	226	224	—	—	—	220	217	—	—	—	—
				0.90	1.02	1.01	—	—	—	1.00	0.98	—	—	—	—

Статистической обработкой экспериментальных данных для каждого случая определялся показатель точности экспериментов, который в большинстве случаев не превышал 7%.

Касательные модули деформаций бетона определялись зависимостью

$$E = \frac{R_n}{\alpha} (1 - b\sigma/R_n)^2 \quad (2)$$

На фиг. 1—4 приведены графики кривых кратковременных деформаций образцов, которые находились под разными длительными постоянными и ступенчато-возрастающими сжимающими нагрузками, при испытании их до разрушения. Одновременно для сравнения приводятся кривые деформаций контрольных (усадочных) образцов. На представленных графиках кривые сгруппированы так, чтобы ясно бы



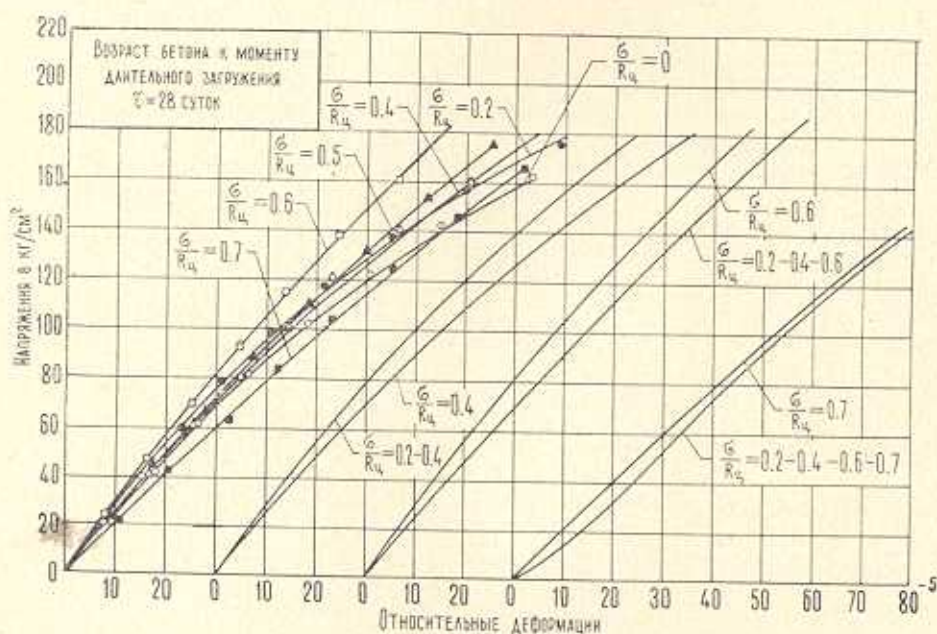
Фиг. 1.

ло видно, во-первых, как влияет длительное сжатие на деформации бетона при загрузении образцов разными постоянными нагрузками и, во-вторых, то различие, которое имеется во влияниях длительного сжатия в случае загрузения образцов постоянной и ступенчатой нагрузками.

Из фиг. 1 ( $\tau = 15 \text{ сут.}$ ), как общая закономерность, следует, что если длительное постоянно действующее напряжение не превышает  $0.7 R_{н}$ , то длительное сжатие приводит к уменьшению последующих

деформаций бетона под кратковременной сжимающей нагрузкой. Уменьшение деформаций даже при  $\sigma/R_u=0.7$  является следствием быстрого спада уровня напряжения благодаря интенсивному росту прочности бетона во времени (на 29 сут до 0.5). Поэтому в этом случае образцы претерпевали скоропроходящую нелинейную ползучесть, и отрицательное влияние нелинейной ползучести, которое связано с образованием и развитием микротрещин, оказалось менее существенным, чем положительная роль линейной ползучести.

На фиг. 1 кривая деформаций образцов  $\sigma/R_u=0.8$  занимает положение ниже всех остальных кривых. Причиной этого является то, что в этом случае отрицательное влияние образовавшихся в процессе длительного сжатия микротрещин преобладало над положительной ролью уплотнения структуры бетона [1].



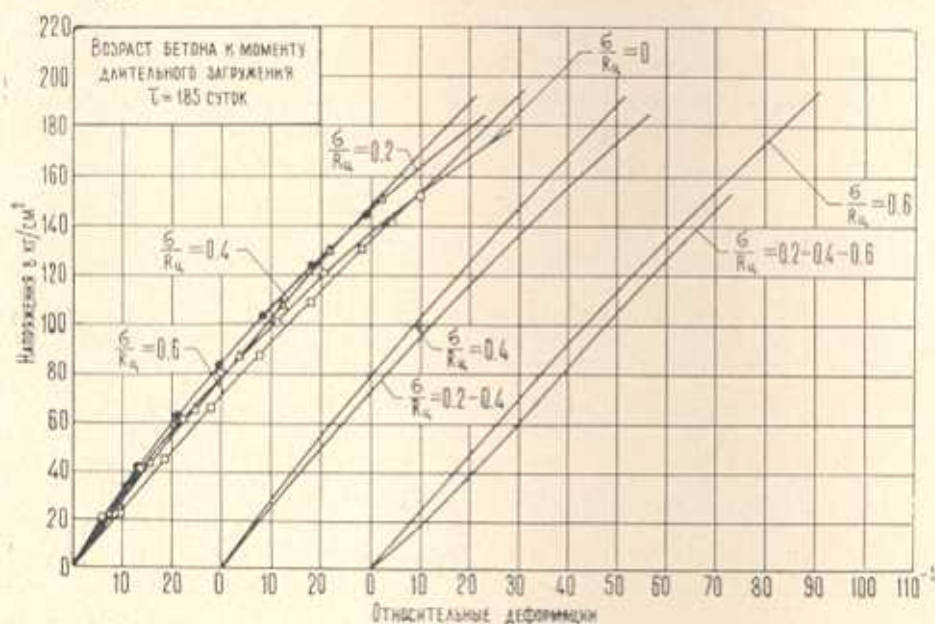
Фиг. 2

Как видно из фиг. 2—4, при  $\tau = 29$  сут. деформации бетона уменьшаются, если уровень напряжения в момент длительного нагружения не превышает 0.6, а при  $\tau = 185$  сут. — 0.4.

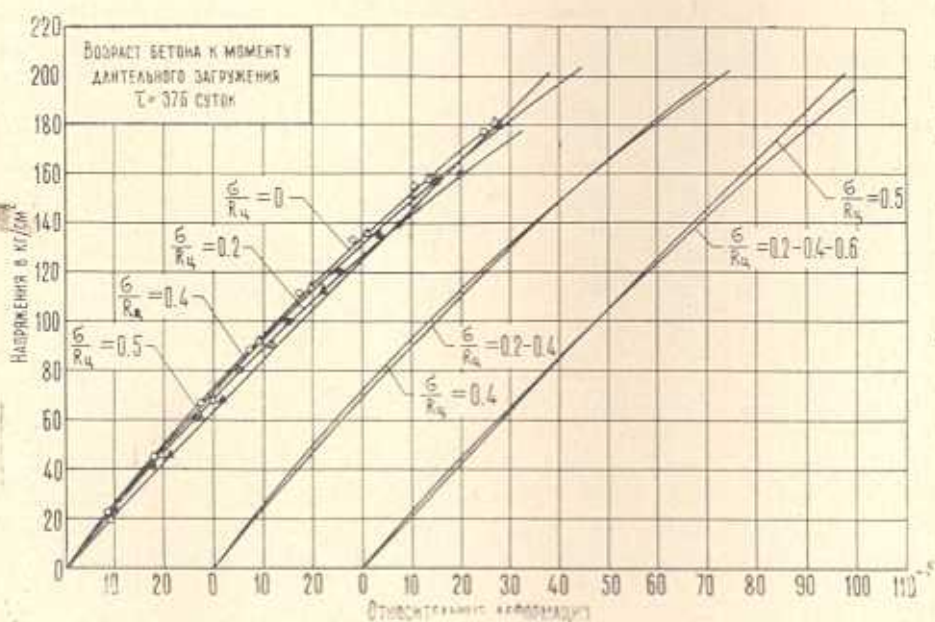
В случае же  $\tau = 376$  сут., если  $\sigma/R_u$  не превышает 0.4, то длительное сжатие практически не оказывает влияния на деформации бетона, а при  $\sigma/R_u \geq 0.5$  деформации возрастают.

Проведенные исследования подтверждают также те выводы одного из авторов данной работы о том, что линейная и скоропроходящая нелинейная ползучесть при сжатии приводят к уменьшению, а нелинейная ползучесть — к увеличению последующих деформаций бетона под кратковременной сжимающей нагрузкой. Со старением бетона влияние

линейной ползучести уменьшается, а нелинейной ползучести увеличивается [1].



Фиг. 3



Фиг. 4

В новых опытах в некоторых случаях также наблюдается изменение характера кривых кратковременных деформаций образцов, подвергнутых длительному сжатию. На фиг. 2 кривая деформаций образ-  
6 Известия АН Армянской ССР. Механика, № 3.

цов, нагруженных ступенчатой нагрузкой 0.2—0.4—0.6—0.7, до некоторого напряжения вогнутостью обращена к оси напряжений, а выше — к оси деформаций. Такой же характер имеет и кривая деформаций образцов, нагруженных ступенчатой нагрузкой 0.2—0.4—0.6 (фиг. 3).

Физическая природа явления, которая приводит к изменению характера кривых деформаций, подробно освещена в работе [1].

Влияние длительного сжатия на модуль деформации бетона

Таблица 3

$\tau$ в сут	Уровень напряжения от кратковременной нагрузки	Модуль деформации бетона по касательной в $\text{т/см}^2$ при $\sigma/R_{\text{п}}$										
		в случае нагружения постоянными нагрузками						в случае нагружения ступенчатыми нагрузками				
		0	0.2	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.2— —0.4	0.2— —0.5	0.2— —0.6	0.2— —0.8
15	0	$\frac{281}{1.00}$	$\frac{424}{1.51}$	$\frac{322}{1.15}$	$\frac{355}{1.19}$	$\frac{297}{1.06}$	$\frac{277}{0.99}$	$\frac{245}{0.87}$	$\frac{443}{1.58}$	—	$\frac{322}{1.15}$	$\frac{285}{1.01}$
	0.25	$\frac{238}{1.00}$	$\frac{303}{1.27}$	$\frac{255}{1.07}$	$\frac{254}{1.07}$	$\frac{242}{1.02}$	$\frac{253}{1.06}$	$\frac{223}{0.94}$	$\frac{316}{1.33}$	—	$\frac{283}{1.19}$	$\frac{261}{1.10}$
	0.50	$\frac{198}{1.00}$	$\frac{202}{1.02}$	$\frac{200}{1.01}$	$\frac{183}{0.92}$	$\frac{192}{0.97}$	$\frac{229}{1.16}$	$\frac{203}{1.03}$	$\frac{211}{1.07}$	—	$\frac{247}{1.25}$	$\frac{239}{1.21}$
29	0	$\frac{271}{1.00}$	$\frac{304}{1.12}$	$\frac{260}{0.94}$	$\frac{261}{0.96}$	$\frac{293}{1.08}$	$\frac{209}{0.77}$	—	$\frac{295}{1.09}$	—	$\frac{243}{0.90}$	—
	0.25	$\frac{213}{1.00}$	$\frac{239}{1.12}$	$\frac{222}{1.04}$	$\frac{227}{1.07}$	$\frac{259}{1.22}$	$\frac{192}{0.90}$	—	$\frac{247}{1.16}$	—	$\frac{227}{1.07}$	—
	0.50	$\frac{163}{1.00}$	$\frac{189}{1.12}$	$\frac{188}{1.15}$	$\frac{195}{1.20}$	$\frac{229}{1.40}$	$\frac{175}{1.07}$	—	$\frac{203}{1.25}$	—	$\frac{211}{1.29}$	—
185	0	$\frac{272}{1.00}$	$\frac{317}{1.17}$	$\frac{275}{1.01}$	—	$\frac{242}{0.89}$	—	—	$\frac{260}{0.96}$	—	—	—
	0.25	$\frac{235}{1.00}$	$\frac{264}{1.12}$	$\frac{245}{1.04}$	—	$\frac{227}{0.97}$	—	—	$\frac{235}{1.00}$	—	—	—
	0.50	$\frac{201}{1.00}$	$\frac{216}{1.07}$	$\frac{190}{0.95}$	—	$\frac{212}{1.05}$	—	—	$\frac{211}{1.05}$	—	—	—
375	0	$\frac{263}{1.00}$	$\frac{256}{0.97}$	$\frac{263}{1.00}$	$\frac{213}{0.81}$	—	—	—	$\frac{253}{0.96}$	$\frac{222}{0.84}$	—	—
	0.25	$\frac{230}{1.00}$	$\frac{221}{0.95}$	$\frac{226}{0.98}$	$\frac{209}{0.91}$	—	—	—	$\frac{224}{0.97}$	$\frac{208}{0.90}$	—	—
	0.50	$\frac{199}{1.00}$	$\frac{189}{0.95}$	$\frac{192}{0.96}$	$\frac{205}{1.03}$	—	—	—	$\frac{196}{0.98}$	$\frac{194}{0.97}$	—	—

Одной из основных задач данных исследований являлось изучение различий, которые могут быть во влиянии длительного сжатия на прочность и деформативность бетона в случае нагружения образцов постоянной и ступенчатой нагрузками. На фиг. 1, где отдельно представлены три пары кривых, деформации образцов, нагруженных пос-



тоянной нагрузкой, во всех случаях получились, хотя и незначительно, но все же больше, чем деформации образцов, нагруженных ступенчатой нагрузкой. Причиной этого является то, что в наших опытах при ступенчатом повышении нагрузки уровни напряжений брались в долях от прочности бетона в момент приложения первых ступеней и поэтому в начальное время фактический уровень напряжения в образцах, нагруженных постоянной нагрузкой, был выше, чем в образцах, нагруженных ступенчатой нагрузкой.

На фиг. 2—4 нетрудно заметить, что если  $\sigma/R_0$  не превышает линейной области ползучести, то со старением бетона разница в кратковременных деформациях образцов, подвергнутых длительному сжатию постоянной и ступенчатой нагрузками, уменьшается и при  $t = 376$  сут. практически стирается.

В табл. 3 приведены касательные модули деформаций бетона в зависимости от исследованных факторов, рассчитанные по формуле (2), которые дают ясное представление о закономерностях влияния длительных постоянных и ступенчато-возрастающих сжимающих нагрузок на модуль деформации бетона.

Институт механики  
АН Армянской ССР

Поступила 11 V 1971

Կ. Ս. ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ, Բ. Ա. ԿՈՏԻՉՅԱՆ

ՀԱՍՏԱՏԱՌԸ ԵՎ ԱՍՏԻՃԱՆԱՅԻՆ ԱՃՈՂ ԵՐԿԱՐԱՏԵՎ ՍԵՂՄՈՂ ԲԵՌՆԵՐԻ  
ԱՉԴԵՏՈՒԹՅՈՒՆԸ ԲԵՏՈՆԻ ԱՄՐՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԳԵՅՈՐՄԱՏԵՎ  
ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՎՐԱ

Ա մ փ ո փ ո լ մ

Աշխատանքում բերվում են բետոնի ամրության և դեֆորմատիվ հատկությունների վրա երկարատև սեղմման ազդեցության էքսպերիմենտալ հետազոտության արդյունքները, կախված լարումների մեծություններից, նրանց փոփոխման ձևից և բետոնի հասակից:

Հետազոտությունները ցույց են տվել, որ երկարատև հաստատուն սեղմող բեռը չի ազդում բետոնի ամրության վրա և էապես է ազդում նրա դեֆորմատիվ հատկությունների վրա: Եթե երկարատև հաստատուն բեռը այնպիսին է եղել, որ նրա ազդեցության տակ նմուշները կրել են գծային սողքի ազդեցությունը, ապա այն բերում է առաձգականության մոդուլի մեծացման: Ոչ գծային սողքը, ընդհակառակը, փոքրացնում է առաձգականության մոդուլը, առանձին դեպքերում բերելով  $\sigma - \varepsilon$ -ն կորի բնույթի փոփոխման:

Եթե երկարատև սեղմող բեռը փորձի անողության ընթացքում մեծանում է աստիճանային ձևով, ապա բեռնաթափելուց, վերականգնման դեֆորմացիաները չափելուց և նմուշների կարճատև փորձարկումից հետո պարզվում է, որ չազդելով ամրության վրա, այն բերում է դեֆորմացիաների մոդուլի ավելի մեծացման, րան երբ երկարատև բեռը հաստատուն էր մնում ամբողջ փորձի ընթացքում:

THE EFFECT OF PROLONGED PERMANENT AND STEPWISE—  
—GROWING COMPRESSIVE LOADS ON THE STRENGTH AND  
DEFORMABILITY OF CONCRETE

K. S. KARAPETIAN, R. A. KOTIKIAN

## S u m m a r y

The study shows that the strength of samples subjected to prolonged compression with varied permanent and stepwise-growing loads does not practically differ from that of shrinkable samples. It is found that linear and transient nonlinear creep under compression causes the decrease while nonlinear creep causes the increase in the subsequent strain of concrete under short-term compressive load. With the concrete aging the effect of linear creep decreases while that of nonlinear creep increases. The strain of samples subjected to permanent load at the age of  $\tau \leq 28$  days is a little greater than that of samples subjected to stepwise load.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Карапетян К. С. Влияние длительного сжатия на прочность и деформативность бетона. Изв. АН АрмССР, сер. физ.-мат. наук, т. XVII, № 6, 1964.
2. Карапетян К. С. О влиянии длительного нагружения на прочность и деформативность бетона. Докл. АН АрмССР, т. 51, № 2, 1970.
3. Карапетян К. С. Ползучесть бетона при кручении. Изв. АН АрмССР, сер. физ.-мат. наук, т. XV, № 6, 1962.
4. Лермит Р. Проблемы технологии бетона. Госстройиздат, М., 1959.
5. Катин Н. И. Исследование ползучести бетона при высоких напряжениях. Тр. НИИЖБ, вып. 4, М., 1959.
6. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений, М., 1961.