

Р. А. КОТИКЯН

## ВЛИЯНИЕ ВОЗРАСТА НА ПОЛЗУЧЕСТЬ БЕТОНА ПРИ СЖАТИИ С ПОСЛЕДУЮЩИМ КРУЧЕНИЕМ

В работе [3] было установлено, что кривая ползучести бетона при простом напряженном состоянии—чистом сжатии, одновременно представляет кривую ползучести при сложном напряженном состоянии—сжатии с последующим кручением. Исследования показали также применимость зависимостей теории упруго-ползучего тела к описанию закономерностей ползучести бетона при сложно-напряженном состоянии.

В настоящей работе приводятся результаты аналогичных исследований, которые отличаются тем, что в этом случае ползучесть бетона при отмеченном выше сложно-напряженном состоянии изучалась в зависимости от такого важного фактора, каким является возраст бетона в момент длительного нагружения. Параллельно исследовалось также соотношение меры ползучести при чистом сжатии и чистом кручении.

Работа выполнена под руководством канд. техн. наук К. С. Карапетяна в лаборатории прочности и ползучести ин-та математики и механики АН АрмССР.

Изготовленные образцы и методика исследования в основном проводились по методике, принятой в работе [3]. Испытанию подвергались полые цилиндрические образцы с наружным диаметром 204 мм, высотой 800 мм и толщиной стенок 20 мм. Образцы были изготовлены из мелкозернистого бетона на кварцевом песке и портландцементе Араратского завода марки 500. Состав бетона приведен в табл. 1.

Таблица 1

| Состав бетона<br>по весу | $\frac{В}{Ц}$ | Расход материала на 1 м <sup>3</sup> бетона в кг |       |      | $\rho$ в т/м <sup>3</sup> |
|--------------------------|---------------|--------------------------------------------------|-------|------|---------------------------|
|                          |               | цемент                                           | песок | вода |                           |
| 1:2.20                   | 0.59          | 610                                              | 1343  | 360  | 2.31                      |

Всего было изготовлено 2 замеса бетона и из каждого замеса было изготовлено по 18 цилиндрических трубчатых образцов и необходимое количество кубиков с ребром 10 см.

Опыты проводились в помещении, где температура  $T = 20 \pm 2^\circ \text{C}$ , а относительная влажность  $P = 60 \pm 10\%$ .

Образцы, изготовленные из первого замеса бетона (18 шт.), были

испытаны под кратковременной нагрузкой в возрасте 7, 14, 28 и 90 дней с целью изучения влияния возраста на прочность и деформативность бетона при сложно-напряженном состоянии. Каждый образец сначала загружался определенной постоянной сжимающей нагрузкой, а затем доводился до разрушения кручением. Величина сжимающего напряжения составляла  $50 \text{ кг/см}^2$ , а относительное напряжение в возрасте 7, 14, 28 и 90 дней соответственно 0.32, 0.21, 0.18 и 0.17. Осевая сжимающая нагрузка и крутящий момент прикладывались ступенями и после каждой ступени нагрузки измерялись деформации.

В табл. 2 приведены прочностные показатели бетона на сжатие  $R_k$ , а также на кручение  $R_{kt}$  при  $\sigma_{sk} = 50 \text{ кг/см}^2$  в различных возрастах. Как видим, кубиковые прочности по испытаниям кубиков, изготовленных из двух разных замесов, практически равны.

Таблица 2

| Прочность в $\text{кг/см}^2$ | Возраст бетона в днях |      |      |      |
|------------------------------|-----------------------|------|------|------|
|                              | 7                     | 14   | 28   | 90   |
| $R_k$ (I серия) . . . . .    | 156                   | 237  | 285  | 286  |
| $R_k$ (II серия) . . . . .   | 148                   | 235  | 260  | 260  |
| $R_{kt}$ . . . . .           | 18                    | 21.4 | 25.1 | 30.0 |

Для исследования ползучести бетона при сложно-напряженном состоянии под длительную нагрузку были установлены 12 образцов, из коих 8—на сложно-напряженное состояние (по два образца в каждом возрасте), 2—на чистое сжатие и 2—на чистое кручение (в возрасте 28 дней). Напряжение во всех образцах от сжимающей нагрузки составляло  $50 \text{ кг/см}^2$ , от крутящих моментов для образцов, нагруженных на сложно-напряженное состояние, —  $8.35 \text{ кг/см}^2$ , а на чистое кручение —  $5.57 \text{ кг/см}^2$ .

В отличие от кратковременных испытаний, когда нагрузка повышалась ступенями, при длительном нагружении образцов в условиях сложного напряженного состояния заданная сжимающая нагрузка и крутящий момент прикладывались сразу.

Продольные деформации ползучести измерялись по четырем образующим на базе 250 мм переносным деформометром, снабженным индикатором с ценой деления 0.002 мм. Деформации кручения измерялись на базе 100 мм с двух сторон образцов с помощью постоянно установленных индикаторов с ценой деления 0.001 мм. Методика измерения деформаций при кратковременных испытаниях отличалась лишь тем, что в этом случае деформации измерялись с помощью постоянно установленных индикаторов.

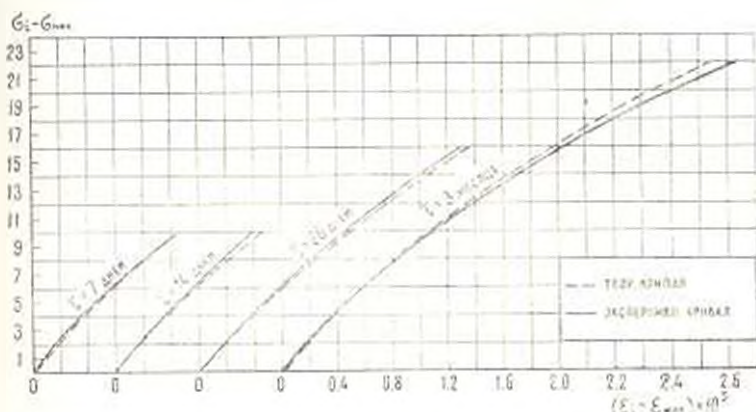
Ползучесть от сжимающей нагрузки определялась как разность суммарных и усадочных деформаций. Усадка измерялась на трех ненагруженных образцах-близнецах.

Интенсивности напряжений и деформаций при сложном нагружении в случае кратковременных испытаний определялись по формулам (1, стр. 295).

$$\sigma_1 = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + 3\sigma_{xz}^2} \quad (1)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{2}{3} \sqrt{\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{yy}^2 + \varepsilon_{xx}\varepsilon_{yy} + \frac{3}{4}\varepsilon_{xz}^2} \quad (2)$$

Интенсивности напряжений и деформаций ползучести также определялись по формулам (1) и (2) лишь с той разницей, что в этом случае в формуле (2)  $\varepsilon_{yy}(t) = 0$ .



Фиг. 1.

Необходимо отметить, что  $\sigma_{xz}$  представляет напряжение от крутящего момента на наружной поверхности образца.

На фиг. 1 сплошными линиями приведены экспериментальные кривые зависимости между интенсивностями деформаций и напряжений при сложно-напряжённом состоянии в различных возрастах. Каждая кривая соответствует средним значениям деформаций 2—3 образцов.

Как и в работе [2], для описания кривых была использована зависимость вида

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_{полз} = A (\sigma_1 - \sigma_{полз}) + B (\sigma_1 - \sigma_{полз})^n \quad (3)$$

где  $A$ ,  $B$  и  $n$  — опытные параметры. В результате описания экспериментальных кривых для опытных параметров получены следующие значения:

$$A = 0.085 \cdot 10^{-5} \frac{\text{см}^2}{\text{кг}}$$

$$B = 0.0025 \cdot 10^{-5} \frac{\text{см}^4}{\text{кг}^2} \quad (4)$$

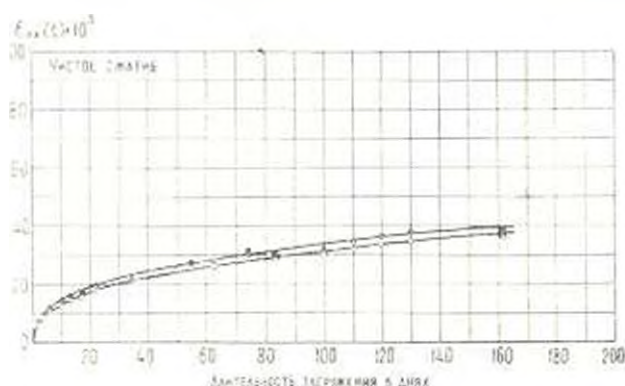
$$n = 2$$

Как видно из фиг. 1, кривые (пунктир), построенные по зависимости (3), хорошо аппроксимируют экспериментальные кривые, соответствующие разным возрастам бетона в момент испытания. Таким образом, возраст бетона не оказывает влияния на зависимость „интенсив-

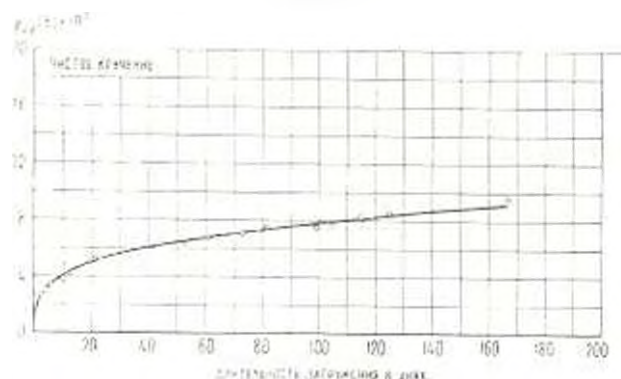
ность деформаций—интенсивность напряжений“ при сложно-напряженном состоянии — сжатие с последующим кручением. Между тем, данные табл. 2 показывают, что при одинаковой начальной сжимающей нагрузке прочность бетона с увеличением возраста увеличивается. Аналогичное явление наблюдалось и в работе [4].

Рассмотрим результаты исследования ползучести полых цилиндрических оболочек при чистом сжатии и чистом кручении, нагруженных в возрасте  $\tau = 28$  дней. Как уже отмечалось, целью этих исследований было изучение ползучести бетонных цилиндрических образцов при чистом кручении и чистом сжатии и определение их взаимосвязи.

На фиг. 2 и 3 приведены экспериментальные кривые ползучести при осевом сжатии  $\epsilon_{xx}(t)$  и чистом кручении  $\gamma_{xz}(t)$ . Поскольку напря-



Фиг. 2.



Фиг. 3.

жение в длительно нагруженных образцах было меньше половины их прочности  $\sigma_{sx} = 50 \text{ кг/см}^2$ ,  $\sigma_{xz} = 5.57 \text{ кг/см}^2$ , можно считать [1], что имела место линейная ползучесть.

Согласно теории упруго-ползучего тела, мера ползучести бетона при осевом сжатии и чистом кручении выражается следующими зависимостями [1]:

$$C(t, \tau) = \varphi(\tau) f(t - \tau) \quad (5)$$

$$m(t, \tau) = 2 [1 + \gamma_2(t, \tau)] C(t, \tau) \quad (6)$$

В работе [3] для описания кривых ползучести цилиндрических образцов была принята мера ползучести в следующей форме:

$$C(t, \tau) = \varphi(\tau) [1 - 0.5 (e^{-\gamma_1(t-\tau)} + e^{-\gamma_2(t-\tau)})] \quad (7)$$

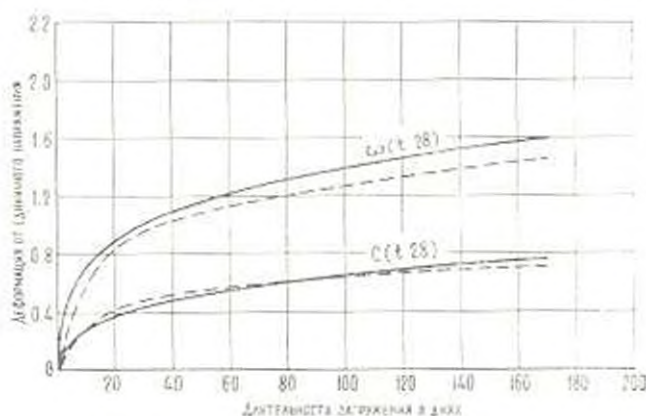
где  $\varphi(\tau)$  — функция старения, а  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  — коэффициенты, определяемые из опыта.

В результате описания кривых ползучести полых цилиндрических бетонных оболочек при чистом сжатии и чистом кручении были получены следующие зависимости:

$$10^5 C(t, 28) = 0.78 [1 - 0.5 (e^{-0.11t} + e^{-0.008t})] \quad (8)$$

$$10^5 \omega(t, 28) = 2.078 [1 - 0.5 (e^{-0.11t} + e^{-0.008t})] \quad (9)$$

На фиг. 4 сплошными линиями представлены экспериментальные кривые ползучести от единичного напряжения при чистом сжатии и



Фиг. 4

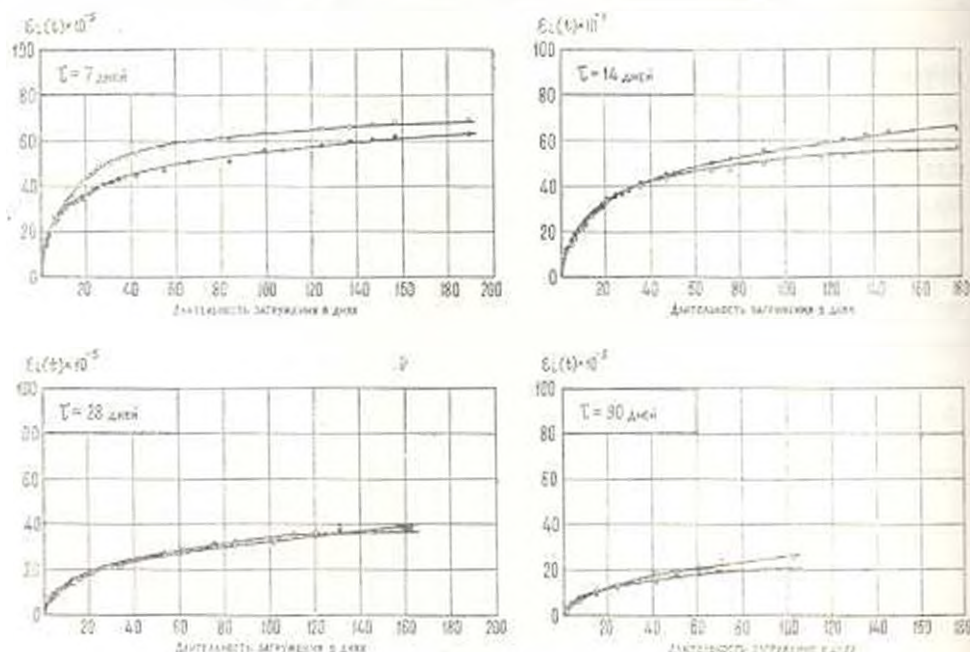
чистом кручении, а пунктирами — теоретические кривые по формулам (8) и (9). Как видно из фиг. 4, формулы (8) и (9) вполне удовлетворительно описывают экспериментальные кривые.

На основании этих опытов вновь подтверждается установленный нами [3], Дукс и Дэвисом [7] и И. Е. Прокоповичем [6] тот факт, что при кручении ползучесть бетона в два раза больше, чем ползучесть бетона при сжатии. Отсюда следует, что  $\gamma_2(t, 28) = 0$ .

Рассмотрим результаты исследования ползучести бетона при сложно-напряженном состоянии. Цель этих исследований заключалась в изучении закономерности ползучести бетона при сложно-напряженном состоянии с учетом старения материала и установление связи между ползучестями бетона при простом и сложном напряженных состояниях.

На фиг. 5 в виде отдельных графиков приведены экспериментальные кривые интенсивности деформаций ползучести  $\dot{\epsilon}(t, \tau)$  всех образцов для различных возрастов бетона в момент загрузки, а на фиг. 6 — те же кривые по средним деформациям ползучести. Как ви-



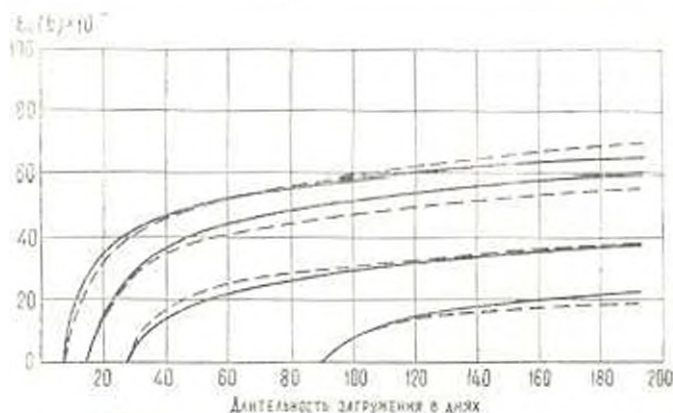


Фиг. 5.

дим, возраст бетона оказывает существенное влияние на интенсивность деформаций ползучести. С увеличением возраста интенсивность деформаций ползучести уменьшается.

В результате описания кривых ползучести цилиндрических бетонных образцов при сложно-напряженном состоянии, соответствующих разным возрастам бетона в момент загрузки, получена следующая зависимость:

$$10^5 \varepsilon_c^s(t, \tau) = \left(0.28 + \frac{18}{\tau} - \frac{65}{\tau^2}\right) \left(1 - 0.5 [e^{-k_1(t-\tau)} - e^{-k_2(t-\tau)}]\right) \varepsilon_1 \quad (10)$$



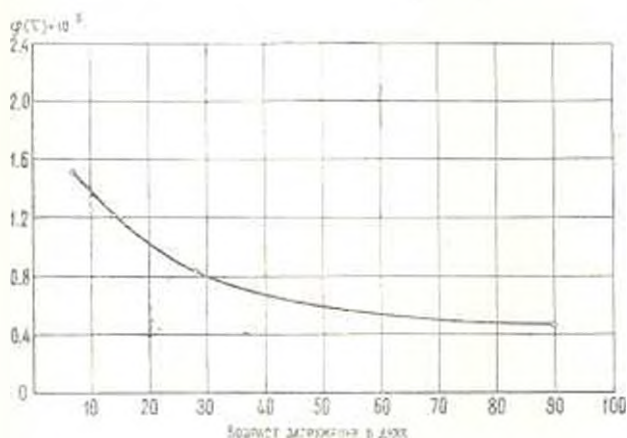
Фиг. 6.

Как видно из фиг. 6, теоретические кривые, показанные пунктирами, хорошо описывают экспериментальные кривые ползучести бето-

на при сложно-напряженном состоянии в различных возрастах бетона.

На фиг. 7 показана функция старения, которая выражается зависимостью

$$10^3 \varphi(\tau) = 0.27 + \frac{18}{\tau} - \frac{65}{\tau^2} \quad (11)$$



Фиг. 7.

Представляет интерес рассмотрение кривых продольных деформаций ползучести  $\epsilon_{xx}(t, \tau)$  и деформаций ползучести сдвига, обусловленных кручением  $\gamma_{xz}(t, \tau)$  при сложно-напряженном состоянии, т. е. когда цилиндрический образец находится под длительной нагрузкой  $\sigma_{xx}$  и  $\tau_{xz}$ . Указанные кривые приведены на фиг. 8 и 9, которые показывают, что возраст бетона оказывает существенное влияние как на продольные, так и на касательные деформации ползучести.

Как уже было показано, мера ползучести бетона при чистом кручении в два раза больше, чем мера ползучести при чистом сжатии.

То обстоятельство, что  $v_2(t, 28) = 0$ , дало возможность посредством более простого уравнения описать экспериментальные кривые ползучести при сжатии и чистом кручении.

В настоящей работе для описания экспериментальных кривых ползучести при сложно-напряженном состоянии с учетом старения материала было принято, что независимо от возраста бетона к моменту загрузки

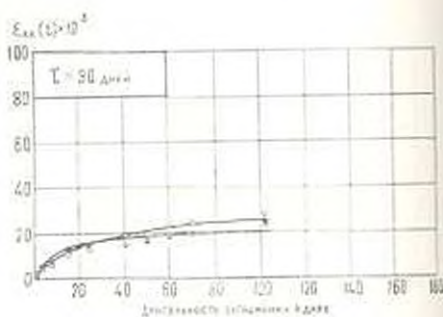
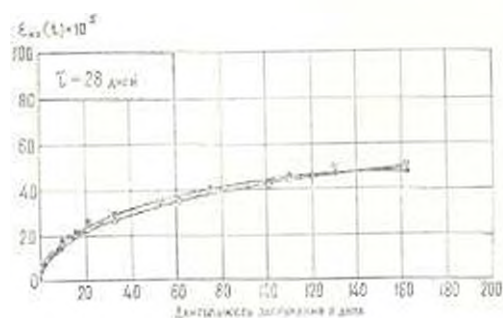
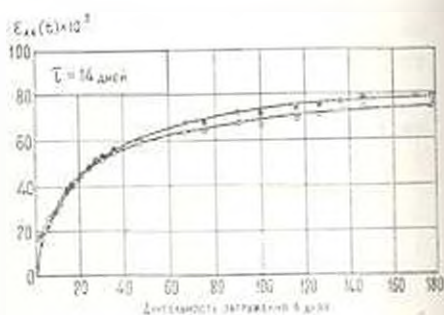
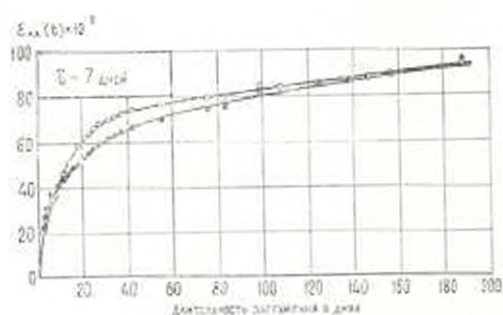
$$v_2(t, \tau) = 0 \quad (12)$$

Напишем формулу (10) в виде

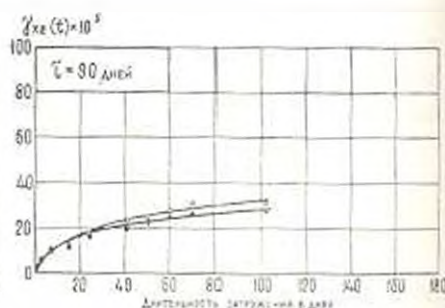
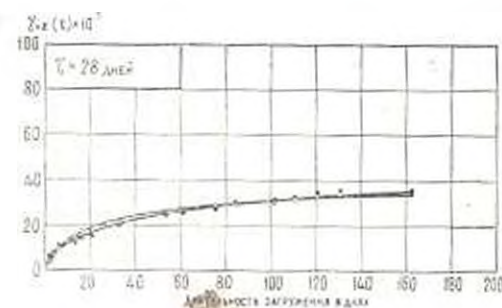
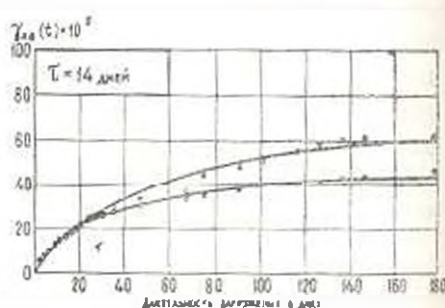
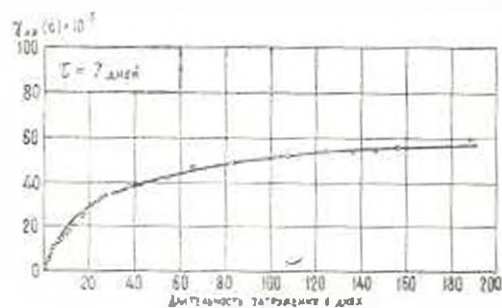
$$\epsilon_i(t, \tau) = C(t, \tau) \sigma_i \quad (13)$$

где  $\sigma_i$  и  $\epsilon_i$  выражаются формулами (1) и (2), а  $C(t, \tau)$  — деформация ползучести от единичного напряжения.

Рассмотрим только продольные деформации под действием напряжения  $\sigma_{xx}$ . Тогда формулы (1) и (2) примут вид:

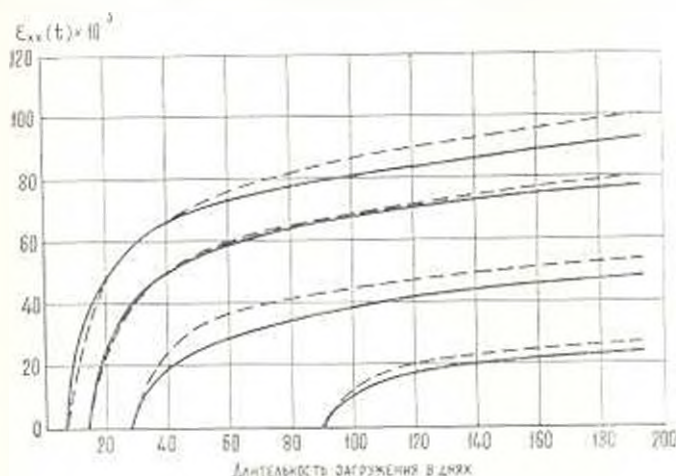


Фиг. 8.



Фиг. 9.





Фиг. 10.

$$\sigma_t = \sigma_{x,t} \quad (1a)$$

$$\varepsilon_t(t, \tau) = \frac{2}{3} \varepsilon_{x,t}(t, \tau) \quad (2a)$$

Подставляя эти значения в формулу (13), получим

$$\varepsilon_{x,t}(t, \tau) = \frac{3}{2} C(t, \tau) \varepsilon_{x,t} \quad (14)$$

На фиг. 10 сплошными линиями показаны семейства экспериментальных кривых продольной деформации ползучести  $\varepsilon_{x,t}(t, \tau)$  в различных возрастах нагружения, а пунктирами — теоретические кривые, рассчитанные по формуле (14). Как видим, формула (14) хорошо описывает экспериментальные кривые.

### В ы в о д ы

1. При испытании цилиндрических образцов на сжатие с последующим кручением разрушающая крутящая нагрузка (при одинаковой начальной сжимающей нагрузке) с увеличением возраста бетона в момент испытания увеличивается.

2. При данном сложном напряженном состоянии возраст бетона не оказывает влияния на зависимость интенсивности деформаций — интенсивности напряжений бетона.

3. Возраст бетона в момент нагружения оказывает существенное влияние на интенсивность деформаций ползучести при сжатии с кручением. С увеличением возраста интенсивность деформаций ползучести уменьшается.

4. Теория упруго-ползучего тела Г. Н. Маслона — Н. Х. Арутюняна позволяет учесть фактор старения бетона для описания кривых ползучести при сжатии с кручением в области линейной ползучести.

Ի. Ա. ԿՈՏԻԿՅԱՆ

# ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԵՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ ԲԵՏՈՆԻ ՍՈՑԻԱԼԻ ՎՐԱ ԲԱՐԴ ԼԱՐՎԱԾՈՒՄԵՆ ՎԵՃԱԿԻ ԴԵՓՈՐՄԱՆ

Ա. Ա. Վ. Ո. Վ. Ո. Վ.

Հոգվածում բերվում են բետոնի սոգքի էքսպերիմենտալ հետազոտությունների արդյունքները՝ սեղմում-սոգքում բարդ լարվածային վիճակում, կախված քանակական մոմենտում բետոնի հասակից:

Հետազոտությունները ջուլը են տվել, որ սոգքի զեֆորմացիաների ինտենսիվությունները մեծապես կախված են նյութի հասակից: Մեքան մեծ է հասակը, այնքան փոքր են սոգքի զեֆորմացիաների ինտենսիվությունը: Ստացված արդյունքները ցույց են տվել, որ միասին լարումից առաջացած սոգքը մարտն ուղղման դեպքում երկու անգամ մեծ է սոգքի լարված սեղմման դեպքում: Երբ նմուշները փորձարկվում են 28 օրեկան հասակում:

Սոգքի էքսպերիմենտալ կորերը պրանցվել են Գ. Ն. Մասյունի և Ն. Ն. Հարությունյանի առաձգա-սոգքային մարմնի տեսությամբ և տվել են բավարար արդյունքներ:

R. A. KOTIKIAN

## THE INFLUENCE OF AGE ON THE CREEP OF CONCRETE IN COMPRESSION WITH SUCCESSIVE TORSION

### S u m m a r y

In this paper the results of experimental investigations of concrete creep in complex state of stress depending on the age of concrete at the moment of test are given.

At a given complex state of stress the age of concrete has a significant effect on the intensity of creep deformation. The more the age the less is the intensity of creep deformation.

Besides, investigations show that creep dimension during torsion is twice as much as creep dimensions during compression at the age of 28 days.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Арутюнян Н. Х. Некоторые вопросы теории ползучести. Гостехиздат, М.—Л., 1952.
2. Карапетян К. С. и Котикян Р. А. Исследование прочности и деформативности бетона при сложно-напряженном состоянии. Докл. АН АрмССР, т. 39, № 14.
3. Карапетян К. С. и Котикян Р. А. Ползучесть бетона при сложно-напряженном состоянии. Известия АН АрмССР, Механика, т. 19, № 4, 1966.
4. Карапетян К. С. и Котикян Р. А. Влияние возраста бетона на прочность и деформативность при сложно-напряженном состоянии. Известия АН АрмССР, Механика, т. 19, № 5, 1966.
5. Карапетян К. С. Ползучесть бетона при высоких напряжениях. Известия АН АрмССР, серия физ.-мат. наук, т. 4, № 2, 1953.
6. Прокопович И. Е. Влияние длительных процессов на напряженное и деформированное состояние сооружений. Гостройиздат, 1963.
7. Duke C. M. and Davis H. H. Some properties of concrete under sustained combined stresses. American Society for Testing Material. Proceedings, vol. 44, 1944.