

Р. А. КОТИКЯН

ПОЛЗУЧЕСТЬ БЕТОНА ПРИ ДВУХОСНОМ РАСТЯЖЕНИИ

Настоящая работа посвящена исследованию ползучести бетона при сложном напряженном состоянии — внутреннее давление с растяжением (двухосное растяжение), выполненному автором под руководством кандидата технических наук К. С. Карапетяна.

Как и в работах [2, 3], испытывались полые цилиндрические образцы с наружным диаметром 204 мм, толщиной стенок 20 мм, высотой 800 мм, изготовленные из мелкозернистого бетона на кварцевом песке и теплонажном цементе марки 800. Состав бетона приведен в табл. 1.

Таблица 1

Состав бетона по весу	Расход материала на 1 м ³			Объемный вес бетона в кг/см ³
	цемент	песок	вода	
1:2,07	614	1273	362	2,25

Всего было изготовлено 36 образцов (по 18 шт. из каждого замеса бетона), которые до момента испытания хранились во влажных условиях при температуре $T = 21 \pm 2^\circ\text{C}$ и относительной влажности $P = 97 \pm 2\%$.

Образцы, изготовленные из первого замеса (18 шт.), были испытаны под кратковременной нагрузкой в возрасте 28 дней с целью изучения прочности и деформативности бетона при сложном напряженном состоянии, а также при чистом растяжении и внутреннем давлении. При испытании на сложное напряженное состояние сначала для каждого образца ступенчатым повышением создавалось внутреннее давление определенной величины, а затем ступенчатым повышением осевой растягивающей нагрузки образец доводился до разрушения. Предельные величины внутренних давлений до начала второго этапа нагружения составляли: 0,70; 1,20; 1,70; 2,20 кг/см². Испытанием образцов на чистое растяжение определялась прочность образцов на осевое растяжение (R_{11}).

Во всех этих испытаниях замерялись продольные и поперечные деформации образцов.

Напряжения от внутреннего давления в тангенциальном и радиальном направлениях определялись по формулам

$$\begin{aligned}\sigma_{yy} &= \frac{pr^2}{R^2 - r^2} \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) \\ \sigma_{zz} &= \frac{pr^2}{R^2 - r^2} \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right)\end{aligned}\quad (1)$$

В этих формулах R , r и r — наружный, средний и внутренний радиусы поперечного сечения образца, а p — внутреннее давление в кг/см².

При определении напряжения от растягивающей нагрузки была учтена и та часть осевой силы, которая создавала внутреннее давление, прикладываемое как к боковым поверхностям образца, так и к торцевым заглушкам.

Прочностные показатели опытных образцов приведены в табл. 2.

Таблица 2

p в кг/см ²	0.00	0.70	1.20	1.70	2.20	4.08
R_{xx} в кг/см ²	17.2	14.8	14.9	15.5	14.9	0.00

Рассматривая прочностные данные, замечаем, что начальное внутреннее давление, когда оно создает напряжение, не превышающее $0.55 R_1$, приводит к некоторому уменьшению прочности бетонных трубчатых образцов на растяжение (R_{xx}).

Для описания кривых деформаций, как и в предыдущих наших работах [2, 3], была использована зависимость

$$\varepsilon_{xx} = A\varepsilon_{xx} + B\varepsilon_{xx}^n \quad (2)$$

где A , B и n — параметры, определяемые из опыта.

В результате описания экспериментальных данных деформаций трубчатых бетонных образцов в случае чистого растяжения получены следующие значения опытных параметров:

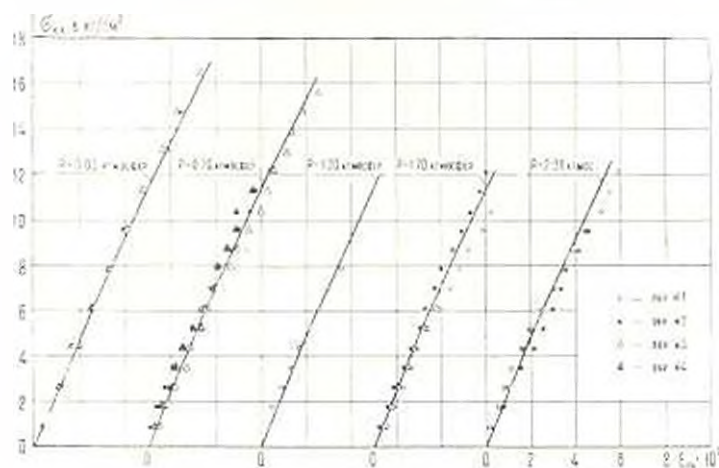
$$\begin{aligned}10^5 A &= 0.393 \frac{\text{см}^2}{\text{кг}} \\ 10^5 B &= 0.004 \frac{\text{см}^4}{\text{кг}^2}\end{aligned}\quad (3)$$

$$n = 2$$

Как видим, на фиг. 1 кривая, построенная на основании зависимости (2) с соответствующими значениями опытных параметров (3), дает весьма удовлетворительную сходимость с опытными данными.

Исследование показало, что первоначальное внутреннее давление, когда последнее создает напряжение, не превышающее $0.55 R_1$, не оказывает существенного влияния на деформации бетонных цилиндрических оболочек при испытании на внутреннее давление с последую-

щим растяжением. Это видно из фиг. 1, где сплошными линиями представлены теоретические кривые второго этапа нагружения, соответствующие разным значениям внутреннего давления (при построении этих кривых за начало координат принята точка догрузки).



Фиг. 1.

В табл. 3 приведены касательные модули деформации бетонных трубчатых образцов при различных значениях ε_{xx} .

Таблица 3

σ_{xx} в кг/см ²	0	2	4	6	8	10
E в т/к/см ²	254	244	235	227	219	211

Для исследования ползучести бетонных трубчатых образцов были использованы остальные 18 образцов, изготовленные из второго замеса бетона. В момент длительного нагружения в возрасте 28 дней все образцы гидроизолировались от влагопотери путем нанесения нескольких слоев расплавленного парафина и в дальнейшем хранились в обычных условиях ($T = 22 \pm 4^\circ \text{C}$, $P = 82 \pm 7\%$).

Всего длительному нагружению были подвергнуты 8 образцов, из коих 6 — сложному напряженному состоянию и 2 — чистому растяжению. Внутреннее давление для всех образцов составляло 1.20 кг/см^2 , а растягивающее напряжение для каждой пары сложено-напряженных образцов — 4.15; 6.75; 9.34 кг/см². В образцах, нагруженных на чистое растяжение, $\varepsilon_{xx} = 7.79 \text{ кг/см}^2$.

При нагружении образцов на длительную нагрузку как растягивающая нагрузка, так и внутреннее давление прикладывались одновременно и выдерживались постоянными во время всего опыта.

В процессе опытов, кроме измерения продольных и поперечных деформаций длительно нагруженных образцов, параллельно на трех ненагруженных образцах-близнецах замерялись усадочные деформации.

ции. Деформации ползучести определялись как алгебраическая сумма деформаций нагруженных и незагруженных образцов.

Интенсивности напряжений и деформаций ползучести при сложно-напряженном состоянии определяются по формулам [1, стр. 295]

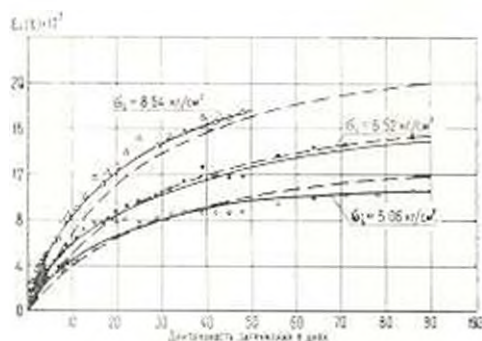
$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2} \quad (4)$$

$$\varepsilon_i^n(t) = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{[\varepsilon_{xx}^n(t) - \varepsilon_{yy}^n(t)]^2 + [\varepsilon_{yy}^n(t) - \varepsilon_{zz}^n(t)]^2 + [\varepsilon_{zz}^n(t) - \varepsilon_{xx}^n(t)]^2} \quad (5)$$

При определении по формуле (5) интенсивности деформаций ползучести трубчатых бетонных образцов при сложном напряженном состоянии, ввиду незначительности, деформация ползучести $\varepsilon_{zz}(t)$ пренебрегалась. Основанием для этого являлось то, что максимальное сжимающее напряжение (σ_{zz}) в стенках трубчатых образцов от действия внутреннего давления составляло 1.2 кг/см^2 , т. е. всего лишь 0.004 от предела прочности бетона на сжатие. С другой стороны, ввиду малой величины коэффициента Пуассона пренебрежима и та часть деформаций $\varepsilon_{zz}(t)$, которую претерпевает образец в направлении оси z под действием осевой растягивающей нагрузки.

Эксперименты проводились, по существу, для случая трехосного неоднородного напряженного состояния, однако наибольшее напряжение σ_{zz} составляло около $25 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$, а средняя величина σ_{xx} — около $12 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$. В связи с относительно небольшими значениями σ_{zz} и ввиду того, что σ_{zz} по характеру — сжимающее напряжение, можно считать, что испытываемые образцы находились в условиях, сравнительно близких к двухосному растяжению.

На фиг. 2 сплошными линиями показаны осредненные экспериментальные кривые интенсивностей деформаций ползучести бетонных цилиндрических оболочек при сложно-напряженном состоянии (внутреннее давление с растяжением).



Фиг. 2.

Для описания экспериментальных кривых ползучести нами использована зависимость теории упруго-ползучего тела, имеющая следующий вид:

$$\varepsilon_i^u(t, \tau) = \varepsilon_i(\tau) [1 - 0.5 [e^{-0.14(t-\tau)} + e^{-0.22(t-\tau)}]] \quad (6)$$

где $\varepsilon_i(\tau)$ — функция старения, τ_1 и τ_2 — опытные параметры, а ε_i и $\varepsilon_i^u(t)$ на основании данных экспериментов определяются зависимостями (4) и (5).

Поскольку в наших опытах образцы были загружены в одном возрасте ($\tau = 28$ дней) и длительная нагрузка в течение всего опыта выдерживалась неизменной, то $\varepsilon(\tau)$ имеет постоянное значение.

На фиг. 2 пунктиром показаны теоретические кривые, построенные по зависимости

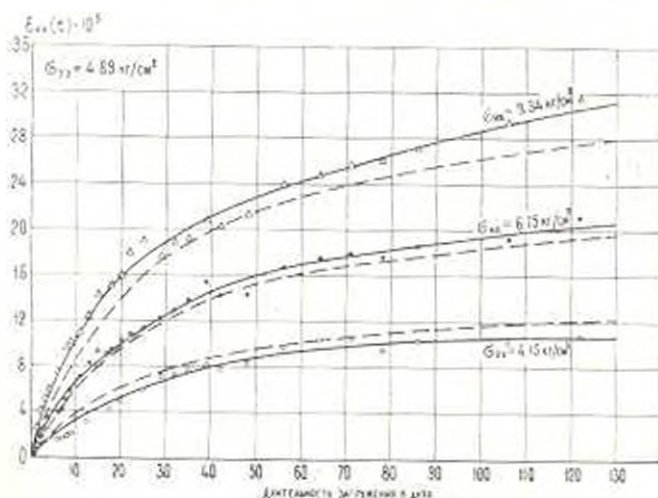
$$10^3 \varepsilon_i^u(t) = 3.5 [1 - 0.5 (e^{-0.05t} + e^{-0.05t})] \varepsilon_i \quad (7)$$

Как видим, расхождение экспериментальных и теоретических кривых ползучести находится в пределах точности опыта.

На фиг. 3 сплошными линиями показаны экспериментальные кривые продольных деформаций ползучести бетонных трубчатых образцов, находящихся в условиях сложного напряженного состояния. Указанные кривые удовлетворительно описываются зависимостью

$$10^3 \varepsilon_{\text{д.д.}}(t) = 4.05 [1 - 0.5 (e^{-0.07t} + e^{-0.08t})] \varepsilon_{\text{д.д.}} \quad (8)$$

Выше отмечалось, что для всех образцов, загруженных на сложное напряженное состояние, внутреннее давление — $p = 1.20$ кг/см².



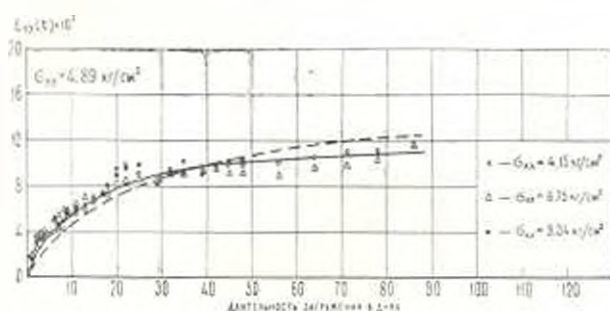
(Фиг. 3.)

На фиг. 4 сплошной линией показана осредненная экспериментальная кривая ползучести от внутреннего давления (растяжение в тангенциальном направлении), а пунктиром — теоретическая кривая, рассчитанная по формуле

$$10^3 \varepsilon_{\text{т.д.}}^u(t) = 3.91 [1 - 0.5 (e^{-0.05t} + e^{-0.05t})] \varepsilon_{\text{т.д.}} \quad (9)$$

Как видим, формула (9) вполне удовлетворительно аппроксимирует экспериментальные данные.

Рассмотрим теперь кривую ползучести чистого растяжения с точки зрения установления возможности перехода от простого напряженного состояния к сложному напряженному состоянию.

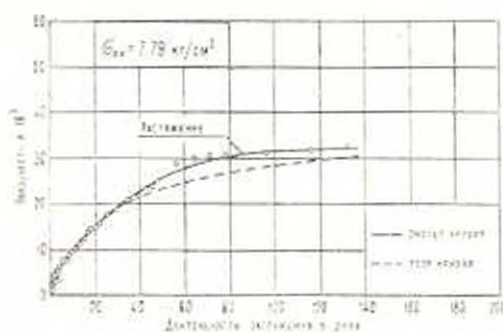


Фиг. 4.

На фиг. 5 сплошной линией представлена экспериментальная кривая деформаций ползучести бетонных трубчатых образцов при чистом растяжении. Исследования показали, что кривая ползучести чистого растяжения хорошо аппроксимируется зависимостью (10)

$$10^3 \varepsilon_{\text{пл}}^n(t) = 5.25 [1 - 0.5(e^{-0.0001t} + e^{-0.00013t})] = \dots \quad (10)$$

Кривая, построенная по данной зависимости, показана пунктиром.



Фиг. 5.

Сравнивая формулы (7) и (10), замечаем, что они расходятся лишь числовыми коэффициентами. Отсюда заключаем, что имея кривую продольной деформации ползучести осевого растяжения бетонных трубчатых образцов, можно найти кривую ползучести таких же образцов при сложном напряженном состоянии (внутреннее давление с последующим растяжением) в случае, когда

$$i = \frac{\sigma_{\text{пл}}}{\sigma_{\text{сж}}} = \frac{4.89 \text{ кг/см}^2}{\sigma_{\text{сж}}} = 1.178, 0.724, 0.524$$

ВЫВОДЫ

1. В пределах рассматриваемых в опытах напряжений

а) внутреннее давление не оказывает влияния на зависимость $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{xx}(\sigma_{xx})$ полых цилиндрических бетонных образцов при сложном нагружении,

б) кривая ползучести чистого растяжения подобна кривым ползучести сложного напряженного состояния (внутреннее давление с растяжением), построенным в координатах интенсивность деформаций ползучести — время.

2. Закон линейного деформирования ползучести подтверждается при сложном нагружении (внутреннее давление с растяжением).

3. Теория упруго-ползучего тела Маслова-Арутюняна вполне применима для описания деформаций ползучести бетонных трубчатых образцов при двухосном растяжении в пределах линейной ползучести.

Институт математики и механики
АН Армянской ССР

Поступила 2 VIII 1967

Ռ. Ա. ԿՈՏԻԿՅԱՆ

ԲԵՏՈՆԻ ԵՐԿՐԱՆՈՒՄԻ ՎԵՐԱՆԵՐՈՒՄ

Ու մ ի ն լ ի ու մ

Հարվածում քիթում են բետոնի սողքի էքսպերիմենտալ հետազոտությունների արդյունքները ներքին ճնշում-ձգում լարվածային վիճակում: Փորձարկման են ենթարկվել 204 մմ արտաքին տրամագծով, 20 մմ պատերի հաստությամբ և 800 մմ երկարությամբ բետոնի զրանային թաղանթներ:

Հետազոտությունները ցույց են տվել, որ դիտարկվող լարումների սահմաններում ներքին ճնշումները չեն ազդում, $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{xx}(\sigma_{xx})$ կապի վրա թուրք բեռնադրման դեպքում:

Սողքի էքսպերիմենտալ կորերը դրանցվել են Մասլով-Հարաթյանյան առաձգա-սողքային մոդելի տեսությամբ, ստացված ճեղաքները չեն դերադանցում փորձի ճշտության սահմանները: Սողքի զծային դեֆորմացիաների տեսությամբ հաստատվում է նաև թուրք բեռնադրման դեպքում:

R. A. KOTIKIAN

THE CREEP OF CONCRETE IN TWO AXES STRAINING

Summary

Results of experimental investigations of creep for concrete tubes subjected to the inner pressure and extention are examined.

The investigations have shown that in limits of examined stresses

the inner pressures do not influence on the dependence $\dot{\epsilon}_{xx} = \dot{\epsilon}_{xx}(\sigma_{xx})$ for compound stressed state. The curve of creep in pure stretch is similar to the curve of creep of compound stressed state. The theory of the deformations of the linear creep is confirmed for compound loading.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Арутюнян Н. Х. Некоторые вопросы теории ползучести. Гостехтеориздат, М.—Л., 1952.
2. Карапетян К. С. и Котикян Р. А. Ползучесть бетона при сложно-напряженном состоянии. Изв. АН АрмССР, Механика, т. XIX, № 4, 1966.
3. Котикян Р. А. Влияние возраста на ползучесть бетона при сжатии с последующим кручением. Изв. АН АрмССР, Механика, т. XX, № 4, 1967.
4. Карапетян К. С., Котикян Р. А. Исследование прочности и деформативности бетона при сложно-напряженном состоянии. Докл. АН АрмССР, т. XXXIX, № 4, 1964.