

ТЕОРИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ

К. С. Карапетян

Влияние анизотропии на ползучесть бетона при сжатии и растяжении в зависимости от масштабного фактора

В работах [6, 7] нами впервые было показано, что влияние анизотропии на прочность, деформативность и ползучесть бетона весьма существенно.

Результаты первых работ [6, 7] привели к выводу, что анизотропия бетона зависит от большого количества факторов. Поэтому общий комплекс изучения этого вопроса включал исследование анизотропии бетона в зависимости от ряда факторов.

В данной работе приводятся результаты исследования влияния анизотропии на ползучесть бетона при сжатии и растяжении в зависимости от одного из важных факторов — фактора масштабности. Некоторые данные будут приведены также о влиянии анизотропии на прочность и деформативность бетона при сжатии и растяжении.

§ 1. Методика исследования

Как и в работах [6, 7], изучение анизотропии бетона велось на образцах, изготовленных при горизонтальном и вертикальном положении форм.

Как известно, в практике изготовления бетонных и железобетонных конструкций применяются оба эти способа.

Исследования влияния анизотропии на прочность, деформативность и ползучесть бетона в зависимости от масштабного фактора были проведены над легким бетоном, приготовленным на песке и щебне из литоидной пемзы. В качестве вяжущего был применен пуцолановый портландцемент Араратского завода активностью 471 кг/см². Состав бетона приведен в табл. 1.

Таблица 1

Состав бетона

Состав бетона по весу	Расход материалов на 1 м ³ бетона в кг				В/Ц	γ _б в т/м ³
	цемент	песок	щебень	вода		
1:1,85:3,0	252	466	754	252	1	1,724

Опыты были поставлены на призматических образцах поперечными сечениями 7×7 , 10×10 , 15×15 и 20×20 см, а при растяжении — на восьмерках таких же сечений. Высота всех призм и восьмерок сечениями 7×7 и 10×10 см составляла 60 см, а остальных восьмерок — 70 см.

Приготовление бетона производилось вручную, а уплотнение на виброплощадке при продолжительности вибрации 30 секунд. Образцы бетониrowались в металлических разборных формах. Назначение и количество изготовленных образцов указаны в табл. 2.

Таблица 2

Назначение и количество изготовленных образцов

Вид образцов	Поперечное сечение образца в см	Назначение и количество образцов						Общее количество образцов по размерам
		для определения прочности и деформативности бетона		для определения усадки бетона		для определения суммарных деформаций усадки и ползучести бетона		
		перпенд. слоям	парал. слоям	перпенд. слоям	парал. слоям	перпенд. слоям	парал. слоям	
Призмы	7×7	3	3	3	3	3	3	18
	10×10	3	3	3	3	3	3	18
	15×15	3	3	3	3	3	3	18
	20×20	3	3	3	3	3	3	18
Восьмерки	7×7	3	3	3	3	—	3	15
	10×10	3	3	3	3	3	3	18
	15×15	3	3	3	3	3	3	18
	20×20	3	3	3	3	3	3	18

Кроме призм и восьмерок, было изготовлено также необходимое количество кубиков размерами ребер 7, 10, 15 и 20 см.

С момента изготовления все образцы хранились в помещении, где температура в период длительных испытаний составляла $T = 21 \pm 5^\circ\text{C}$, а относительная влажность — $P = 62 \pm 12\%$.

Образцы были установлены под длительную нагрузку при возрасте бетона 28 дней. Напряжение во всех призмах составляло 20 кг/см^2 , а в восьмерках — 4 кг/см^2 .

Деформации длительно нагруженных, а также усадочных образцов измерялись с помощью специального переносного деформометра, снабженного микронным индикатором. База измерения деформаций составляла 250 мм.

Наблюдения за деформациями продолжались 258 дней, после чего все образцы были разгружены и велись наблюдения за восстановлением упруго-мгновенных деформаций и деформаций ползучести.

Для исследования влияния анизотропии на призмную прочность, предел прочности при осевом растяжении и на деформативность бетона при сжатии и растяжении в зависимости от масштабного фактора в 28-дневном возрасте были испытаны 24 призмы и 24 восьмерки.

Испытание призм и восьмерок производилось ступенчатым нагружением образцов и измерением продольных деформаций после каждой

Таблица 3

Влияние анизотропии на кубиковую и призмную прочность бетона в зависимости от масштабного фактора

Поперечное сечение призма в см	Возраст бетона к моменту испытания	$\frac{h}{a}$	Прочностные характеристики бетона, когда направление сжимающей силы при испытании по отношению к слоям бетона								$\frac{R'_{np}}{R_{np}}$
			перпендикулярно				параллельно				
			R в кг/см ²	R_{np} в кг/см ²	$\frac{R_{np}}{R}$	$\frac{R_{np}}{R_{np(20)}}$	R' в кг/см ²	R'_{np} в кг/см ²	$\frac{R'_{np}}{R_*}$	$\frac{R'_{np}}{R_{np(20)}}$	
7×7	28 дней	8,6	177	84	0,47	0,62	177	135	0,76	1,05	1,61
10×10		6	171	114	0,66	0,85	180	125	0,70	0,97	1,10
15×15		4	—	132	—	0,98	165	138	0,83	1,08	1,05
20×20		3	—	134	—	1,00	159	128	0,86	1,00	0,95
7×7	1 год	8,6	140	87	0,62	0,50	168	146	0,87	0,86	1,68
10×10		6	163	148	0,90	0,85	170	151	0,89	0,89	1,02
15×15		4	206	143	0,70	0,82	197	173	0,88	1,02	1,21
20×20		3	204	175	0,86	1,00	195	169	0,86	1,00	0,96

Обращает на себя внимание и то обстоятельство, что если в 28-дневном возрасте при испытании перпендикулярно слоям призмная прочность призм сечением 7×7 см составляет 62% от призмной прочности призм сечением 20×20 см, то в годичном возрасте то же самое составляет 50%. Получилось это так, потому что призмная прочность призм сечением 20×20 см дала во времени заметное нарастание в то время, как прочность призм сечением 7×7 см практически не изменилась. Аналогичное явление имеет место и по испытаниям призм параллельно слоям.

Как уже мы наблюдали, в 28-дневном возрасте кубиковая прочность получилась тем больше, чем меньше размеры кубиков. По данным же годичных испытаний имеет место обратное явление. Причем кубиковая прочность наименьших кубиков во времени не возросла, а, наоборот, даже наблюдается некоторый спад прочности.

Изменение закономерностей зависимости кубиковой и призмной прочности от масштабного фактора во времени является несомненно следствием тех температурно-влажностных условий, в которых хранились образцы. Поскольку влажность среды была невысокая, образцы малых сечений быстрее обезвоживались, и оставшаяся вода была недостаточна для нормального твердения бетона.

Отчасти спад прочности бетона обусловлен и тем, что цемент, примененный в наших опытах, был пуцолановым, а, как известно, при этом условии твердения приобретают еще большее значение.

Таким образом, влияние масштабного фактора на прочность бетона в большой мере зависит от температуры и влажности среды, где хранится бетон.

Рассмотрение данных табл. 3 с точки зрения влияния анизотропии на прочность бетона показывает, что влияние анизотропии на призмную

ную прочность в большой мере зависит от масштабного фактора. С увеличением размеров поперечного сечения призм влияние анизотропии на призмную прочность уменьшается.

На основании данных табл. 3 можно прийти также к выводу, что, чем старше бетон, тем больше влияние анизотропии на призмную прочность бетона.

Экспериментальные кривые деформаций каждой серии образцов, состоящей из трех призм одного сечения, были описаны зависимостью следующего вида

$$\varepsilon = \frac{a \frac{\sigma}{R_{np}}}{1 - b \frac{\sigma}{R_{np}}}, \quad (1)$$

где a и b — коэффициенты, определяемые из опыта.

На основании формулы (1) для модуля деформации получается следующая зависимость

$$E = \frac{R_{np}}{a} \left(1 - b \frac{\sigma}{R_{np}} \right)^2, \quad (2)$$

где $\frac{R_{np}}{a}$ представляет начальный модуль деформации бетона.

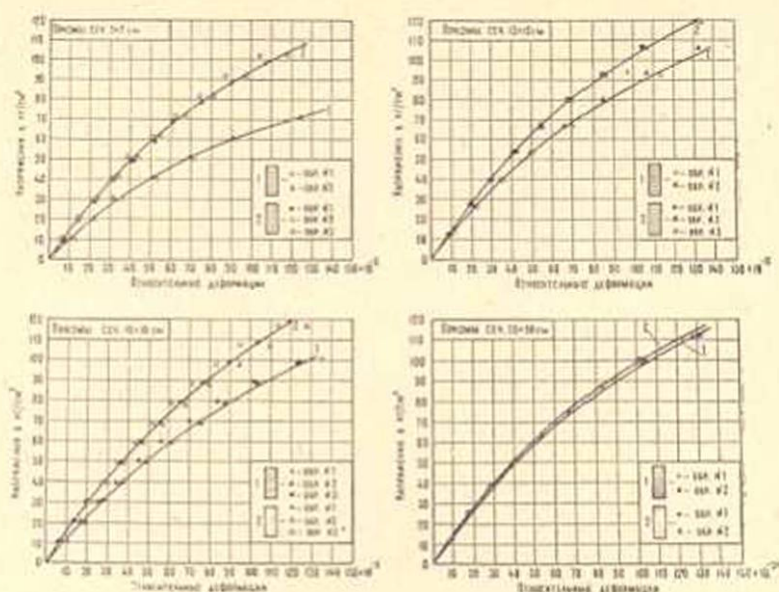
На фиг. 1 приведены кривые деформаций призматических образцов разных сечений, испытанных перпендикулярно и параллельно слоям бетона в 28-дневном возрасте. Аналогичные кривые по результатам испытания образцов в годичном возрасте приведены на фиг. 2. В отличие от фиг. 1 на графиках фиг. 2 экспериментальные точки представляют средние полные деформации всех образцов одной серии при каждой ступени нагрузки.

Как видно из фиг. 1 и 2, почти во всех случаях кривые деформаций призм, испытанных параллельно слоям, занимают положение выше кривых деформаций тех призм, которые были испытаны перпендикулярно слоям. Таким образом, в первом случае деформации меньше, чем во втором случае. Однако, как видим, разница деформаций с увеличением сечения призм уменьшается.

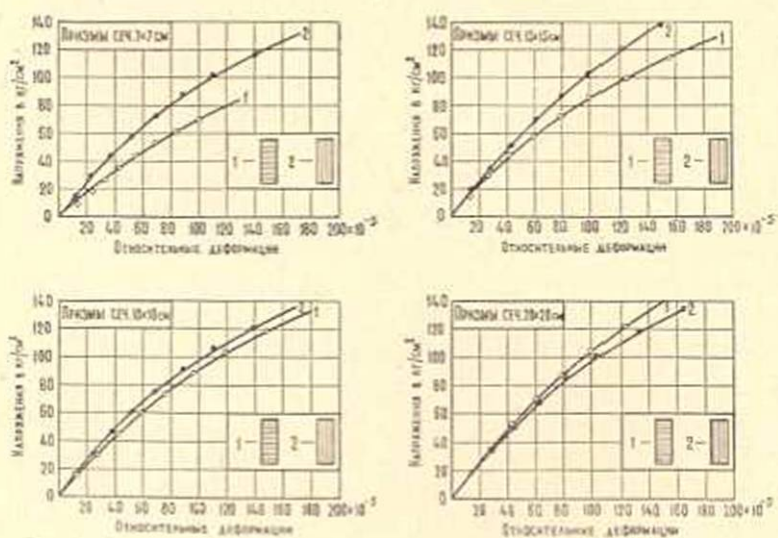
В табл. 4 приведены модули деформаций по касательным при различных напряжениях, определенные по формуле (2).

На основании данных табл. 4 с увеличением размеров образца отношение модуля деформации образцов, испытанных параллельно слоям, к модулю деформации образцов, испытанных перпендикулярно слоям, уменьшается, а с увеличением напряжения возрастает.

Таким образом, влияние анизотропии на модуль деформации бетона при сжатии в большой мере зависит от масштабного фактора и от величины напряжения. Чем больше напряжение и меньше сечение образца, тем больше это влияние.



Фиг. 1. Влияние анизотропии на деформативность бетона при сжатии в зависимости от масштабного фактора (возраст бетона 29 дней).



Фиг. 2. Влияние анизотропии на деформативность бетона при сжатии в зависимости от масштабного фактора (возраст бетона 1 год).

Рассмотрим результаты опытов по исследованию влияния анизотропии на ползучесть бетона при сжатии в зависимости от масштабного фактора. На фиг. 3 приведены экспериментальные кривые ползучести бетона для разных размеров образцов, испытанных перпендикулярно и параллельно слоям.

Как видим, кривые деформаций образцов, нагруженных перпендикулярно слоям, расположились выше кривых деформаций образцов, нагру-

желных параллельно слоям. Причем сказанное имеет место при всех размерах образцов. Однако, с увеличением размеров образца расхождение кривых ползучести образцов, испытанных перпендикулярно и параллельно слоям укладки бетона, уменьшается.

Таблица 4

Влияние анизотропии на модуль деформации бетона при сжатии в зависимости от масштабного фактора

Возраст бетона к моменту испытания	Поперечное сечение образца, в см	Направление сжимающей силы при испытании по отношению к слоям бетона	Модуль деформации бетона по касательной в тн/см^2 при напряжении			Отношение модуля деформации образцов, испытанных параллельно слоям, к модулю деформаций образцов, испытанных перпендикулярно слоям при напряжении		
			$\sigma=0$	$\sigma=50$ кг/см^2	$\sigma=100$ кг/см^2	$\sigma=0$	$\sigma=50$ кг/см^2	$\sigma=100$ кг/см^2
28 дней	7×7	перпенд.	111	48	12	1,40	2,00	2,25
		парал.	155	97	27			
	10×10	перпенд.	125	83	50	1,30	1,36	1,46
		парал.	162	113	73			
	15×15	перпенд.	134	86	46	1,19	1,25	1,43
		парал.	160	108	66			
	20×20	перпенд.	149	99	60	1,07	1,04	1,00
		парал.	160	103	59			
1 год	7×7	перпенд.	96	62	36	1,41	1,47	1,55
		парал.	135	91	56			
	10×10	перпенд.	128	91	60	1,10	1,10	1,10
		парал.	141	100	66			
	15×15	перпенд.	121	83	52	1,10	1,26	1,54
		парал.	134	105	80			
	20×20	перпенд.	140	109	82	0,97	0,91	0,82
		парал.	136	99	67			

В табл. 5 приведены данные, которые дают ясное качественное и количественное представление о влиянии анизотропии на ползучесть бетона в зависимости от масштабного фактора.

Как видно из табл. 5, с увеличением размеров образца влияние анизотропии на ползучесть бетона при сжатии уменьшается.

Таким образом, влияние анизотропии на ползучесть бетона при сжатии в большей мере зависит от масштабного фактора и выражается такой же закономерностью, что и влияние анизотропии на деформативность бетона при кратковременных испытаниях.

Как известно, аналитическое выражение меры ползучести бетона, предложенное Н. Х. Арутюняном, имеет следующий вид [1]

$$C(t, \tau) = \varphi(\tau) f(t - \tau), \quad (3)$$

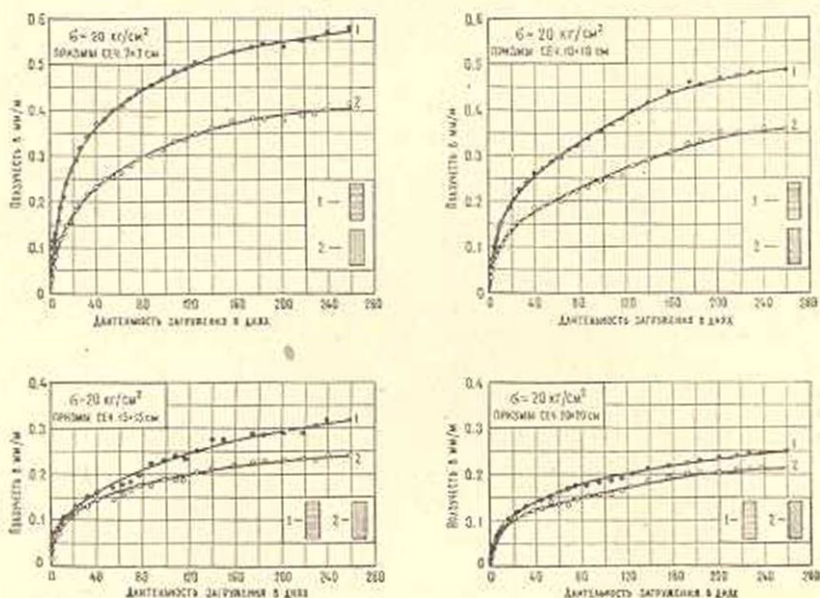
где $\varphi(\tau)$ — функция старения, а $f(t - \tau)$ — функция длительности нагружения [1].

В раскрытом виде формула (3) пишется так

$$C(t, \tau) = \left(C_0 + \frac{A}{\tau}\right) [1 - e^{-\gamma(t-\tau)}]. \quad (4)$$

Мы считаем, что выражение (4) будет более гибким, если его представить в следующем виде

$$C(t, \tau) = \left(C_0 + \frac{A}{\tau}\right) [1 - 0,5(e^{-\gamma_1(t-\tau)} + e^{-\gamma_2(t-\tau)})]. \quad (5)$$



Фиг. 3. Влияние анизотропии на ползучесть бетона при сжатии в зависимости от масштабного фактора.

Таблица 5
Влияние анизотропии на ползучесть бетона при сжатии в зависимости от масштабного фактора

Поперечное сечение призмы в см	Относительные деформации ползучести при $t=258$ дней, когда направление сжимающей силы по отношению к слоям бетона при испытании		$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$
	перпенд. ($\varepsilon_n \times 10^3$)	парал. ($\varepsilon_n^* \times 10^3$)	
7x7	57,3	40,5	1,41
10x10	49,0	36,0	1,36
15x15	31,7	24,0	1,32
20x20	25,0	21,5	1,16

Наши исследования показали, что мера ползучести бетона с учетом влияния масштабного фактора на ползучесть бетона может быть представлена в следующем виде [10]

$$C(t, \tau, a) = \varphi(\tau, a) f(t - \tau), \quad (6)$$

где a — это наименьший размер поперечного сечения бетонного элемента. В нашем случае a представляет размер стороны поперечного сечения призмы.

Для описания экспериментальных кривых ползучести бетона в зависимости от масштабного фактора нами получены следующие зависимости:

а) для образцов, испытанных перпендикулярно слоям

$$\varepsilon_a(t, 28, a) = \left(0,006 + \frac{0,195}{a}\right) [1 - 0,5 (e^{-0,05t} + e^{-0,005t})] \times 20, \quad (7)$$

б) для образцов, испытанных параллельно слоям

$$\varepsilon_a^*(t, 28, a) = \left(0,006 + \frac{0,13}{a}\right) [1 - 0,5 (e^{-0,05t} + e^{-0,005t})] \times 20. \quad (8)$$

В данных зависимостях t — длительность загрузки, а функции масштабности имеют следующий вид:

а) для образцов, испытанных перпендикулярно слоям

$$\varphi(28, a) = 0,006 + \frac{0,195}{a}, \quad (9)$$

б) для образцов, испытанных параллельно слоям

$$\varphi^*(28, a) = 0,006 + \frac{0,13}{a}. \quad (10)$$

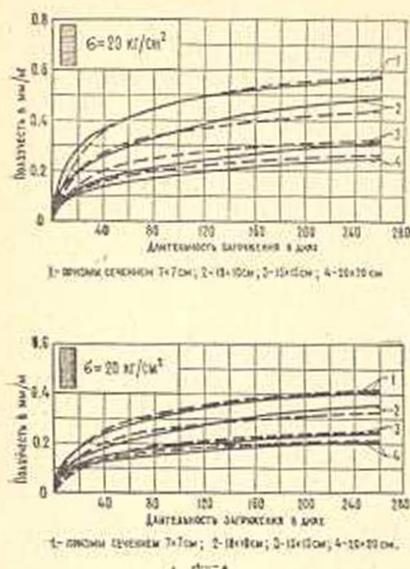
Как видно, функции масштабности (9) и (10) отличаются лишь значениями одного коэффициента, что обусловлено анизотропией бетона. Рассматривая эти выражения, нетрудно заметить, что когда $a = \infty$, то

$$\varphi(28, \infty) = \varphi^*(28, \infty) = 0,006.$$

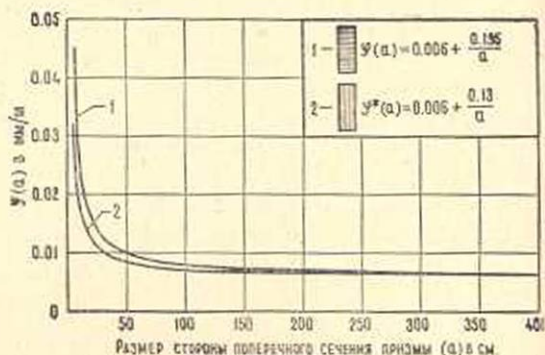
Таким образом, 0,006 представляет предельную меру ползучести бетонного массива с размерами, равными бесконечности, при которых влияние анизотропии на ползучесть бетона отпадает.

Однако, с практической точки зрения уже при $a \geq 200$ см влиянием масштабного фактора и анизотропии на ползучесть бетона можно пренебречь. Это ясно видно и из фиг. 4, где функции масштабности (9) и (10) представлены графически. На фиг. 5 приведены экспериментальные кривые ползучести образцов разных сечений, испытанных перпендикулярно и параллельно слоям (сплошные линии), и пунктиром кривые, построенные по формулам (7) и (8), которые дают хорошее совпадение с опытными данными.

Таким образом, влияние анизотропии на призмную прочность, модуль деформации и ползучесть бетона при сжатии в большой мере зависит от масштабного фактора. С увеличением размеров поперечного сечения бетонного элемента влияние анизотропии уменьшается.



Фиг. 4. Влияние масштабного фактора на ползучесть бетона при сжатии (сплошные линии — опытные кривые, пунктирные линии — теоретические кривые).



Фиг. 5. Кривые функций масштабности для образцов, испытанных перпендикулярно и параллельно слоям.

§ 3. Влияние анизотропии на ползучесть бетона при растяжении в зависимости от масштабного фактора

Если влияние масштабного фактора на ползучесть бетона при сжатии более или менее изучено, то влияние масштабного фактора на ползучесть бетона при растяжении, насколько нам известно, пока никем не изучалось. Поэтому и с этой точки зрения наши исследования представляют определенный интерес.

Как ранее отмечалось, для исследования влияния анизотропии на прочность и деформативность бетона при растяжении в 28-дневном и годичном возрастах были испытаны восьмерки перпендикулярно и параллельно слоям. Результаты этих испытаний приведены в табл. 6.

Данные табл. 6, относящиеся к испытаниям образцов в 28-дневном возрасте, показывают уменьшение прочности бетона на растяжение с увеличением размеров образца. Такая же закономерность имела место в опытах Г. Д. Цискрели [15]. Однако, как видим по результатам наших испытаний, в годичном возрасте уже наблюдается обратное явление.

Таким образом, и при растяжении, как и в случае сжатия, характер зависимости прочности бетона от масштабного фактора во времени изменился. Данное явление также следует объяснить низкой влажностью помещения, где хранились образцы.

На основании данных табл. 6 предел прочности бетона на растяжение во всех случаях больше в образцах, испытанных параллельно слоям, то есть точно так, как это мы наблюдали при рассмотрении влияния ан-

анизотропии на призмную прочность бетона. С другой стороны, и при растяжении с увеличением размеров поперечного сечения образца влияние анизотропии на прочность бетона уменьшается, а с увеличением возраста бетона — увеличивается.

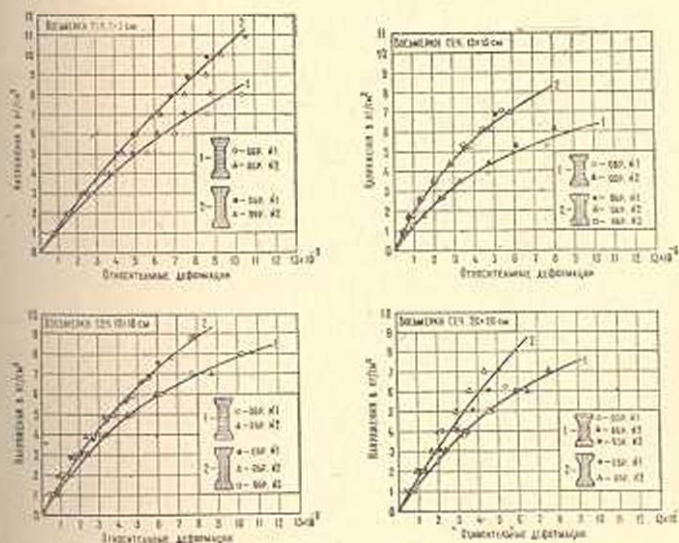
Таблица 6

Влияние анизотропии на прочность бетона при растяжении в зависимости от масштабного фактора

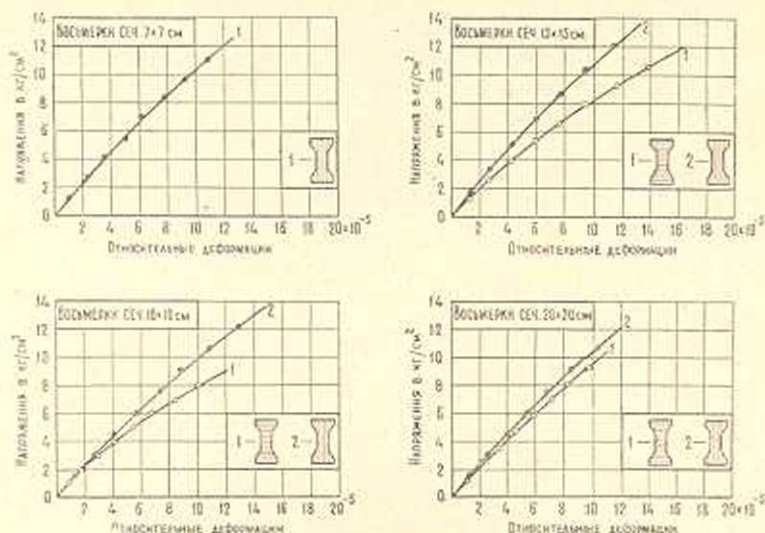
Возраст бетона к моменту испытания	Поперечное сечение восьмерки в см	Предел прочности бетона при растяжении в кг/см ² , когда направление растягивающей силы при испытании по отношению к слоям бетона		$\frac{R'_p}{R_p}$
		перпенд. (R_p)	парал. (R'_p)	
28 дней	7×7	9,5	12,5	1,31
	10×10	9,4	10,4	1,11
	15×15	7,9	8,3	1,05
	20×20	8,1	9,2	1,14
1 год	7×7	—	13,9	—
	10×10	10,0	15,2	1,52
	15×15	13,3	17,3	1,30
	20×20	11,7	15,2	1,30

Таким образом, влияние анизотропии на прочность бетона при растяжении выражается теми же закономерностями, что и влияние анизотропии на призмную прочность бетона.

На фиг. 6 приведены кривые деформаций образцов разных сечений при растяжении, испытанных в 28-дневном возрасте. Аналогичные кривые деформаций образцов, испытанных в годичном возрасте, представлены на фиг. 7.



Фиг. 6. Влияние анизотропии на деформативность бетона при растяжении в зависимости от масштабного фактора (возраст бетона 28 дней).



Фиг. 7. Влияние анизотропии на деформативность бетона при растяжении в зависимости от масштабного фактора (возраст бетона 1 год).

На фиг. 6 и 7 во всех случаях кривые деформаций образцов, испытанных параллельно слоям, расположились выше кривых деформаций образцов, испытанных перпендикулярно слоям.

Таким образом, и при растяжении деформации бетона в образцах, испытанных перпендикулярно слоям, больше, чем в образцах, испытанных параллельно слоям. Так, например, при напряжении 6 кг/см^2 и возрасте бетона 28 дней отношение деформаций при указанных двух видах испытаний для восьмерок сечением $7 \times 7 \text{ см}$ составляет 1,29, а для восьмерок сечениями 10×10 , 15×15 и $20 \times 20 \text{ см}$ соответственно 1,34; 1,20 и 1,46. По данным же испытаний в годичном возрасте те же отношения при напряжении 8 кг/см^2 для восьмерок сечениями 10×10 , 15×15 и $20 \times 20 \text{ см}$ соответственно составляют 1,31; 1,23 и 1,11. Последние цифры показывают, что с увеличением сечения образца влияние анизотропии на деформации бетона при растяжении уменьшается, хотя по данным 28-дневных испытаний такой четкой закономерности не наблюдается.

В табл. 7 приведены значения модулей деформаций по касательной для образцов разных сечений, испытанных перпендикулярно и параллельно слоям при различных напряжениях в возрасте 28 дней и 1 год.

Согласно данным табл. 7, во всех случаях модули деформаций восьмерок, испытанных параллельно слоям, больше, чем модули деформаций восьмерок, испытанных перпендикулярно слоям. Причем их отношение в зависимости от различных факторов колеблется в пределах от 1,63 до 2,77.

Согласно данным испытаний, в 28-дневном возрасте чем больше сечение образцов, тем больше отношение модуля деформации образцов, испытанных параллельно слоям, к модулю деформации образцов,

испытанных перпендикулярно слоям. По данным же испытаний в годичном возрасте такая закономерность четко не имеет место.

Таблица 7

Влияние анизотропии на модуль деформации бетона при растяжении

Возраст бетона к моменту испытания	Поперечное сечение, см	Направление растягивающей силы по отношению к слоям бетона при испытании	Модуль деформации по касательной в тн/см^2 при напряжении			Отношение модуля деформаций образцов, испытанных параллельно слоям, к модулю деформаций образцов, испытанных перпендикулярно слоям при напряжении		
			$\sigma=0$	$\sigma=4$ кг/см^2	$\sigma=8$ кг/см^2	$\sigma=0$	$\sigma=4 \text{ кг/см}^2$	$\sigma=8 \text{ кг/см}^2$
28 дней	7×7	перпенд.	122	87	58	1,10	1,32	1,69
		парал.	134	115	98			
	10×10	перпенд.	157	87	37	1,10	1,39	2,11
		парал.	173	121	78			
	15×15	перпенд.	152	60	—	1,41	2,00	—
		парал.	214	121	55			
1 год	20×20	перпенд.	159	89	39	1,10	1,57	2,77
		парал.	175	140	108			
	7×7	перпенд.	—	—	—	—	—	—
		парал.	123	109	95			
	10×10	перпенд.	115	83	56	1,03	1,25	1,61
		парал.	119	104	90			
	15×15	перпенд.	106	85	67	1,22	1,35	1,52
		парал.	130	115	102			
	20×20	перпенд.	106	97	89	1,14	1,12	1,10
		парал.	121	109	98			

Из табл. 7 можно также заключить, что с увеличением напряжения влияние анизотропии на модуль деформации увеличивается.

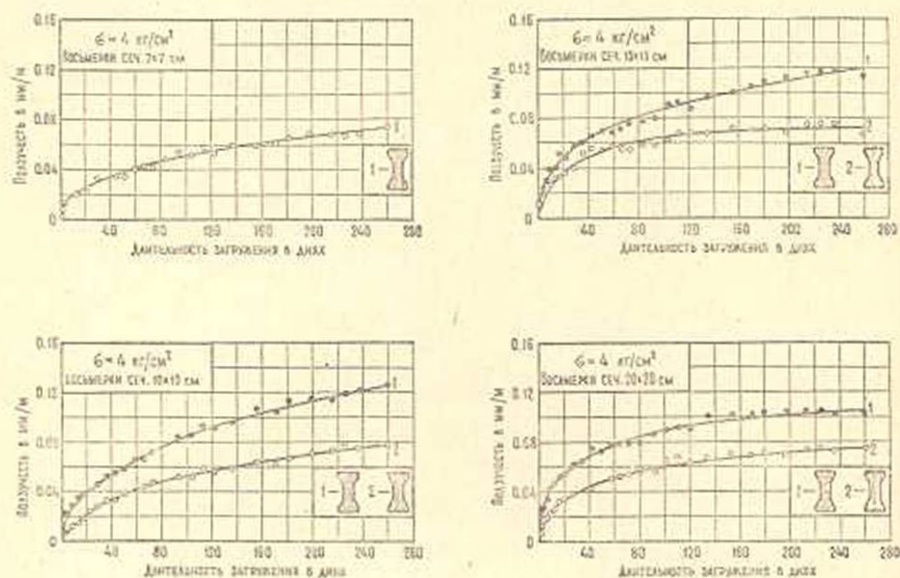
Перейдем к рассмотрению результатов опытов исследования влияния анизотропии на ползучесть бетона при растяжении в зависимости от масштабного фактора (фиг. 8). И в этом случае кривые ползучести бетонных восьмерок, испытанных перпендикулярно слоям, расположились выше кривых ползучести восьмерок, испытанных параллельно слоям.

Таким образом, и при растяжении деформации ползучести образцов, испытанных перпендикулярно слоям, больше, чем деформации ползучести образцов, испытанных параллельно слоям. Так, например, их отношение при длительности загрузки 258 дней для восьмерок сечением 10×10 см составляет 1,62, а для восьмерок сечениями 15×15 и 20×20 см соответственно 1,64 и 1,43.

Интересно сравнить эти данные с аналогичными данными для случая сжатия с целью выяснения, в каком случае влияние анизотропии более существенно (табл. 8).

На основании данных табл. 8 влияние анизотропии на ползучесть бетона при растяжении более существенно, чем при сжатии. Однако, сказанное пока следует считать правильным для линейной области ползучести. Здесь мы имеем в виду то обстоятельство, что при растяжении связь между напряжениями и деформациями ползучести линейна почти

до напряжения, соответствующего пределу прочности бетона [2, 11]. Что касается сжатия, то после определенного напряжения линейная зависимость между напряжениями и деформациями ползучести нарушается, то есть имеет место нелинейная ползучесть [4, 9, 11].



Фиг. 8. Влияние анизотропии на ползучесть бетона при растяжении в зависимости от масштабного фактора.

Таблица 8
Влияние анизотропии на ползучесть бетона при сжатии и растяжении в зависимости от масштабного фактора

Поперечное сечение образца в см	Длительность загрузки в днях	Отношение деформаций ползучести образцов, испытанных перпендикулярно слоям, к деформациям ползучести образцов, испытанных параллельно слоям при	
		сжатии	растяжении
7×7	258	1,40	—
10×10	258	1,36	1,62
15×15	258	1,32	1,64
20×20	258	1,16	1,43

Рассмотрение результатов опытов по исследованию влияния анизотропии на ползучесть бетона при сжатии показало, что с увеличением размеров поперечного сечения бетонных призм влияние анизотропии на ползучесть бетона уменьшается (табл. 8). На основании данных этой же таблицы как-будто аналогичный вывод можно сделать и для случая растяжения. Однако, нам кажется, делать такой вывод будет преждевременно, так как отсутствуют соответствующие данные по образцам сечением 7×7 см, а по данным остальных трех размеров восьмерок такая четкая закономерность не наблюдается. Мы склонны считать, что при

растяжении влияние анизотропии на ползучесть бетона не зависит от масштабного фактора.

Как уже отмечалось, результаты опытов над образцами, испытанными параллельно слоям, с точки зрения влияния масштабного фактора на ползучесть бетона при сжатии и растяжении подробно рассмотрены в работе [10]. При этом было установлено, что влияние масштабного фактора на ползучесть бетона весьма существенно при сжатии, а при растяжении практически отсутствует. Причем такой же вывод вытекает и из опытов над образцами, испытанными перпендикулярно слоям бетона.

Чтобы сказанное было бы убедительным, на фиг. 9 приведены кривые ползучести разных размеров образцов, испытанных перпендикулярно и параллельно слоям. Поскольку масштабный фактор не оказывает влияния на ползучесть бетона при растяжении, то и отношение деформаций ползучести образцов, испытанных перпендикулярно и параллельно слоям, не будет зависеть от масштабного фактора.

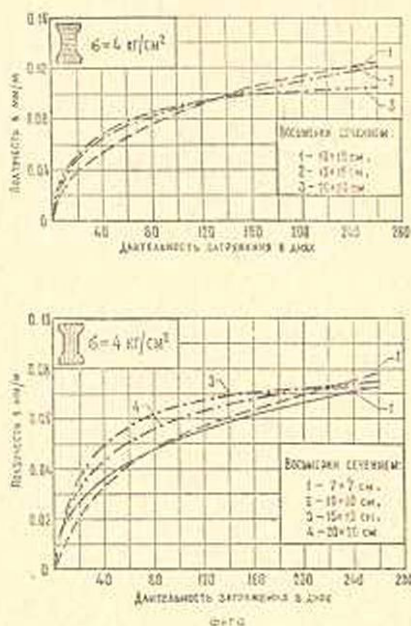
Таким образом, тот вывод, что влияние анизотропии на ползучесть бетона при растяжении не зависит от масштабного фактора, следует считать вполне обоснованным.

§ 4. Влияние анизотропии на восстановление упругих деформаций и деформаций ползучести бетона в зависимости от масштабного фактора

Как известно, в момент разгрузки бетона, длительно находившегося под нагрузкой, мгновенно восстанавливается часть упругой деформации и далее со временем — часть деформации ползучести [3, 7, 11, 13, 16].

Восстановление деформаций обусловлено тем, что при разгрузке бетона упруго-деформированный заполнитель стремится восстановить свою первоначальную форму, однако, этому препятствует затвердевший во времени цементный камень. Поэтому имеет место не полное, а частичное восстановление как упругих деформаций, так и деформаций ползучести.

В настоящей работе также исследовалось восстановление упруго-мгновенных деформаций и деформаций ползучести в зависимости от масштабного фактора с учетом анизотропии бетона. С этой целью все образцы разных сечений, нагруженные длительной нагрузкой на сжатие



Фиг. 9. Влияние масштабного фактора на ползучесть бетона при растяжении.

и растяжение, были разгружены и велись наблюдения за восстановлением их деформаций. Разгрузка образцов была осуществлена на 258-й день.

Наблюдения за восстановлением деформаций ползучести или, как принято еще их называть, деформаций упругого последствия продолжались 79—84 дня. Полученные опытные данные приведены в табл. 9 и 10.

Таблица 9

Восстановление упругих деформаций и деформаций ползучести после разгрузки бетона из-под длительной нагрузки сжатия

Поперечное сечение призмы в см	Направление сжимающей силы по отношению к слоям бетона	Упругая деформация и момент длительного за-гружения $\times 10^3$	Деформация ползучести при $t = 258$ дней $\times 10^3$	Восстановлен-ная часть упругой деформации $\times 10^3$	Восстановлен-ная часть деформаций ползучести $\times 10^3$	Процент восстановления	
						Упругой деформации	Деформации ползучести
7×7	перпенд.	21,1	57,3	20,9	5,8	99	10,1
	парал.	14,0	40,7	16,2	6,2	116	15,2
10×10	перпенд.	17,3	49,0	18,6	5,0	107	10,2
	парал.	13,1	36,0	16,6	4,8	126	13,3
15×15	перпенд.	15,7	31,7	15,5	4,5	99	14,2
	парал.	13,5	24,0	14,0	4,6	104	19,1
20×20	перпенд.	13,8	25,0	14,1	5,0	102	20,0
	парал.	13,5	21,5	14,6	4,0	108	18,6

Таблица 10

Восстановление упругих деформаций и деформаций ползучести после разгрузки бетона из-под длительной нагрузки растяжения

Поперечное сечение колонны в см	Направление растягивающей силы по отношению к слоям бетона	Упругая деформация и момент длительного за-гружения $\times 10^3$	Деформация ползучести при $t = 258$ дней $\times 10^3$	Восстановлен-ная часть упругой деформации $\times 10^3$	Восстановлен-ная часть деформаций ползучести $\times 10^3$	Процент восстановления	
						упругой деформации	деформации ползучести
7×7	перпенд.	—	—	—	—	—	—
	парал.	3,2	7,5	3,8	1,5	119	20,0
10×10	перпенд.	3,4	12,6	4,8	2,4	141	19,5
	парал.	2,8	7,7	3,0	0,9	107	11,6
15×15	перпенд.	3,5	11,4	3,8	0,7	109	6,1
	парал.	2,5	6,7	2,8	1,2	112	17,9
20×20	перпенд.	3,4	10,7	4,2	1,4	123	13,1
	парал.	2,3	7,4	2,8	0,9	122	12,1

На основании данных этих таблиц упруго-мгновенные деформации призм всех размеров, загруженных на длительное сжатие перпендикулярно слоям, в момент разгрузки восстановились полностью. Что касается призм, загруженных параллельно слоям, то их обратимые упруго-мгновенные деформации получились даже больше, чем соответствующие упруго-мгновенные деформации в момент длительного нагружения.

Полное и даже большее восстановление упругих деформаций, на первый взгляд, противоречит механизму данного явления. Однако, нам

кажется, здесь никаких противоречий нет. Все дело в том, что частичное восстановление упруго-мгновенных деформаций имеет место в тех случаях, когда прочность и модуль деформации бетона во времени возрастают. В наших же опытах, как уже было показано, модуль деформации бетона в годичном возрасте оказался меньше, чем в 28-дневном возрасте. А по этой причине в процессе длительного нагружения под неизменной нагрузкой, помимо деформаций ползучести, по мере падения модуля деформации увеличились и упругие деформации бетона. Именно это и привело к тому, что в момент разгрузки обратимые упруго-мгновенные деформации получились больше, чем в момент длительного нагружения. Большее восстановление упруго-мгновенных деформаций, очевидно, обусловлено также и тем, что в момент разгрузки одновременно с упруго-мгновенными деформациями частично восстановились и деформации ползучести.

Благодаря падению модуля деформации во времени аналогичную картину мы наблюдаем также в опытах на растяжение (табл. 10).

На основании данных табл. 9 как упругая деформация, так и деформация ползучести после разгрузки бетона относительно больше восстанавливаются в тех призмах, которые были нагружены длительной нагрузкой сжатия параллельно слоям. Аналогичная закономерность наблюдалась и в ранее проведенных нами опытах [7].

Как следует из табл. 9, восстановление деформаций ползучести сжатия в большой мере зависит и от масштабного фактора. Чем больше сечение образца, тем относительно больше восстанавливается ползучесть после разгрузки бетона. Одновременно с увеличением сечения образца влияние анизотропии на обратимость деформаций ползучести уменьшается.

Рассмотрение данных табл. 10 показывает, что по опытам на растяжение нет такой четкой закономерности в восстановлении деформаций ползучести в зависимости от масштабного фактора, как это имело место в опытах на сжатие. Однако, очевидно, в этом случае правильнее будет заключить, что с увеличением сечения образца процент восстановления деформаций ползучести уменьшается.

На основании проведенных исследований могут быть сделаны следующие основные выводы.

1. Анизотропия бетона оказывает влияние на призмную прочность и модуль деформации бетона при сжатии, благодаря чему призмная прочность и модуль деформации в призмах, испытанных параллельно слоям, больше, чем в призмах, испытанных перпендикулярно слоям.

Влияние анизотропии на призмную прочность и модуль деформации бетона в большой мере зависит от масштабного фактора. С увеличением размеров поперечного сечения образца влияние анизотропии уменьшается.

2. Анизотропия бетона оказывает влияние на прочность и модуль деформации бетона при растяжении, благодаря чему прочность и модуль

деформации при растяжении в восьмигранниках, испытанных параллельно слоям, больше, чем в восьмигранниках, испытанных перпендикулярно слоям.

Влияние анизотропии на прочность и модуль деформации бетона в большой мере зависит от масштабного фактора. С увеличением размеров поперечного сечения образца влияние анизотропии уменьшается.

3. При сжатии чем больше напряжение, тем больше влияние анизотропии на модуль деформации бетона.

4. С увеличением возраста бетона влияние анизотропии на призмную прочность и модуль деформации бетона при сжатии увеличивается.

5. Масштабный фактор оказывает большое влияние на ползучесть бетона при сжатии. С увеличением размеров поперечного сечения образца ползучесть уменьшается.

6. Масштабный фактор не оказывает влияния на ползучесть бетона при растяжении.

7. Влияние масштабного фактора (α) и возраста бетона к моменту длительного нагружения (τ) на меру ползучести бетона при сжатии в теории упруго-ползучего тела может быть выражено функциональной зависимостью.

8. Анизотропия бетона оказывает влияние на ползучесть бетона при сжатии, благодаря чему ползучесть в призмах, испытанных параллельно слоям, меньше, чем в призмах, испытанных перпендикулярно слоям.

Влияние анизотропии на ползучесть бетона при сжатии в большой мере зависит от масштабного фактора. С увеличением размеров поперечного сечения образца влияние анизотропии уменьшается.

9. Анизотропия бетона оказывает влияние на ползучесть бетона при растяжении, благодаря чему ползучесть в восьмигранниках, испытанных параллельно слоям, меньше, чем в восьмигранниках, испытанных перпендикулярно слоям.

Влияние анизотропии на ползучесть бетона при растяжении не зависит от масштабного фактора.

10. Влияние анизотропии на ползучесть бетона более существенно при растяжении, чем при сжатии.

11. После разгрузки бетона, длительное время находившегося под сжимающей нагрузкой, как упругая деформация, так и деформация ползучести в призмах, нагруженных параллельно слоям, относительно больше восстанавливаются, чем в призмах, нагруженных перпендикулярно слоям. Обратимость ползучести в большой мере зависит от масштабного фактора. С увеличением поперечного сечения образца влияние анизотропии на обратимость деформаций ползучести уменьшается.

12. После разгрузки бетона, длительное время находившегося под растягивающей нагрузкой, чем меньше поперечное сечение образца, тем относительно больше обратимые деформации ползучести.

Կ. Ս. Կարապետյան

ԱՆԻՋՈՏՐՈՊԻԱՅԻ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ ԲԵՏՈՆԻ ՍՈՂՔԻ ՎՐԱ
ՍԵՆՄԱՆ ԵՎ ԶԳՄԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ՝ ԿԱԽՎԱԾ ՄԱՍՇՏԱԲԻ ԳՈՐԾՈՆԻՑ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Աշխատության մեջ բերված են անիզոտրոպիայի ազդեցության ուսումնասիրության արդյունքները բետոնի սողքի վրա սեղմման և ձգման դեպքում՝ կախված մասշտաբի կարևոր գործոնից:

Հետազոտությունները ցույց են տվել, որ անիզոտրոպիան էապես ազդում է բետոնի ամրության ու ղեֆորմացիաների մոդուլի վրա և՛ սեղմման, և՛ ձգման ժամանակ: Նմուշների շերտերին զուգահեռ փորձարկումների ժամանակ բետոնի ամրությունն ու ղեֆորմացիաների մոդուլը զգալիորեն մեծ են, քան շերտերին ուղղահայաց փորձարկումների դեպքում: Այդ ազդեցությունը մեծ լափով կախված է մասշտաբի գործոնից: Նմուշների լայնական կտրվածքների լափսերի մեծացման հետ անիզոտրոպիայի ազդեցությունը փոքրանում է:

Սեղմման դեպքում անիզոտրոպիայի ազդեցությունը ամրության ու ղեֆորմացիաների մոդուլի վրա կախված է լարումից և բետոնի հասակից: Որքան մեծ են բետոնի հասակը և լարումը, այնքան մեծ է անիզոտրոպիայի ազդեցությունը: Այս դեպքում անիզոտրոպիան մեծ ազդեցություն ունի բետոնի սողքի վրա, որը կախված է մասշտաբի գործոնից—որքան մեծ են նմուշի լայնական կտրվածքի լափսերը, այնքան փոքր են բետոնի սողքը և անիզոտրոպիայի ազդեցությունը:

Ձգման ժամանակ անիզոտրոպիան էապես ազդում է բետոնի սողքի վրա, որի հետևանքով նմուշների շերտերին զուգահեռ փորձարկումների դեպքում սողքը փոքր է, քան շերտերին ուղղահայաց փորձարկումների դեպքում: Բայց այս դեպքում արդեն ո՛չ անիզոտրոպիան և ո՛չ էլ բետոնի սողքի ղեֆորմացիաները կախված չեն մասշտաբի գործոնից: Սեղմված նմուշների բեռնալիսման ժամանակ, լայնական կտրվածքի լափսերի մեծացման հետ անիզոտրոպիայի ազդեցությունը սողքի վերականգնվող ղեֆորմացիաների վրա փոքրանում է:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Арутюнян Н. Х. Некоторые вопросы теории ползучести. Гостехиздиг, М.—Л., 1952.
2. Васильев П. И. Некоторые вопросы пластических деформаций бетона. Изв. ВНИИГ, 48, 1953.
3. Карапетян К. С. О ползучести туфобетона. Известия АН АрмССР, серия физ.-мат., ест. и техн. наук, 5, № 4, 1952.
4. Карапетян К. С. Ползучесть бетона при высоких напряжениях. Известия АН АрмССР, серия физ.-мат., ест. и техн. наук, 5, № 4, 1952.
5. Карапетян К. С. Влияние размеров образца на усадку и ползучесть бетона. Известия АН АрмССР, серия физ.-мат., ест. и техн. наук, 9, № 1, 1956.
6. Карапетян К. С. Об одном существенном факторе в прочностных и деформативных свойствах бетона. Доклады АН АрмССР, 24, № 4, 1957.
7. Карапетян К. С. Влияние анизотропии на деформации ползучести бетона. Известия АН АрмССР, серия физ.-мат. наук, 10, № 6, 1957.

8. *Карапетян К. С.* Влияние фактора времени на прочность и деформативность бетона на литонидной пемзе и некоторые другие его свойства. Сборник трудов „Гидротехнический бетон на литонидной пемзе“. Издательство АН АрмССР, Ереван, 1958.
9. *Карапетян К. С.* Влияние старения бетона на зависимость между напряжениями и деформациями ползучести. Известия АН АрмССР, серия физ.-мат. наук, 12, № 4, 1959.
10. *Карапетян К. С.* Влияние масштабного фактора на ползучесть бетона при сжатии и растяжении. Доклады АН АрмССР, 38, № 3, 1964.
11. *Катин Н. И.* Исследование ползучести бетона при высоких напряжениях. Сборник НИИЖБ „Исследование свойств бетона и железобетонных конструкций“. Госстройиздат, М., 1959.
12. *Прокопович И. Е.* Влияние длительных процессов на напряженное и деформативное состояние сооружений. Госстройиздат, М., 1963.
13. *Улицкий И. И.* Ползучесть бетона. Гостехиздат, УССР, Киев—Львов, 1948.
14. *Улицкий И. И.* Практический метод расчетного определения деформаций ползучести и усадки бетона. Бетон и железобетон, № 4, 1962.
15. *Цискрели Г. Д.* Сопротивление растяжению неармированных и армированных бетонов. Госстройиздат, М., 1954.
16. *Яшин А. В.* Ползучесть бетона в раннем возрасте. Сборник НИИЖБ „Исследование свойств бетона и железобетонных конструкций“. Госстройиздат, М., 1959.