

ТЕОРИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ

К. С. Карапетян

**Влияние анизотропии на ползучесть бетона при сжатии и
 растяжении в зависимости от величины напряжения**

(Представлено академиком АН Армянской ССР Н. Х. Арутюняном 20/1964)

В работе приводятся результаты исследования влияния анизотропии на ползучесть бетона при сжатии и растяжении в зависимости от величины напряжения.

Опыты были поставлены над легким бетоном, приготовленным на песке и щебне из литоидной пемзы.

В качестве вяжущего был применен пуцолановый портландцемент Араратского завода, активностью 471 кг/см^2 . Состав бетона по весу 1:1, 86:3, 03, В/Ц=1,07.

Исследования велись на призматических образцах и восьмерках сечением $10 \times 10 \text{ см}$, высотой 60 см .

Как и в работах (¹⁻³), влияние анизотропии на ползучесть бетона исследовалось на образцах, изготовленных из одного и того же бетона при вертикальном и горизонтальном положениях форм.

Приготовление бетона производилось вручную, а уплотнение на виброплощадке при продолжительности вибрации 30 секунд.

Всего было приготовлено 30 призм и 40 восьмерок, а также соответствующее количество кубиков размерами ребер 10 см .

Образцы освобождались от форм через 72 часа, после чего до возраста 27 дней хранились во влажной камере, далее в помещении, где температура в период длительных опытов составляет $22 \pm 5^\circ \text{C}$, а относительная влажность — $61 \pm 13\%$.

Под длительную нагрузку в возрасте 29 дней были установлены 20 призм и 24 восьмерки, из коих 50% перпендикулярно, а 50% параллельно слоям. Напряжения в призмах составляли 15; 30; 45 и 60 кг/см^2 , а в восьмерках 1.5; 3.0; 4.0 и 5.0 кг/см^2 .

Для исследования влияния анизотропии на прочность и деформативность бетона в 29-дневном и годичном возрастах были испытаны кубики, призмы и восьмерки. Испытание призм производилось ступенчатым нагружением и выдержкой под каждой ступенью нагрузки в течение одной минуты. Каждая ступень нагрузки составляла примерно 0,1 от предела прочности бетона. Восьмерки испытывались без выдержки.

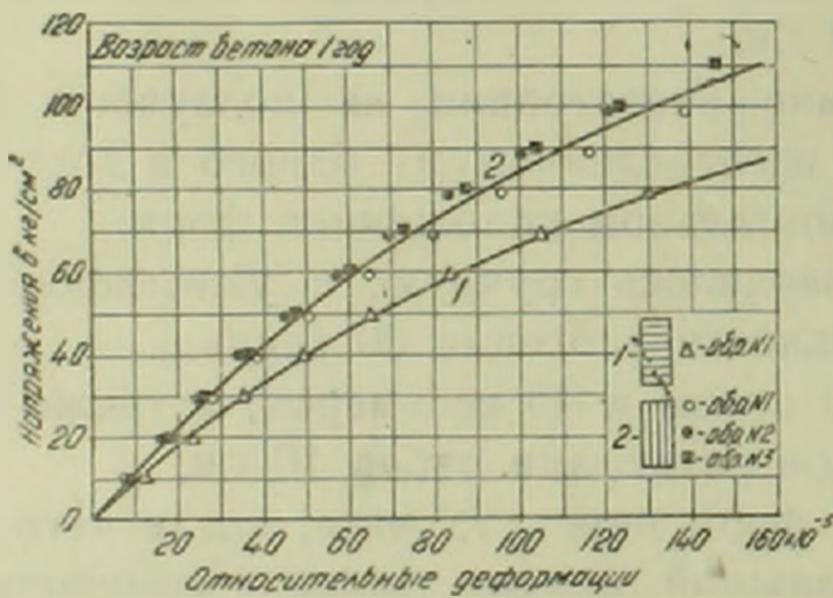
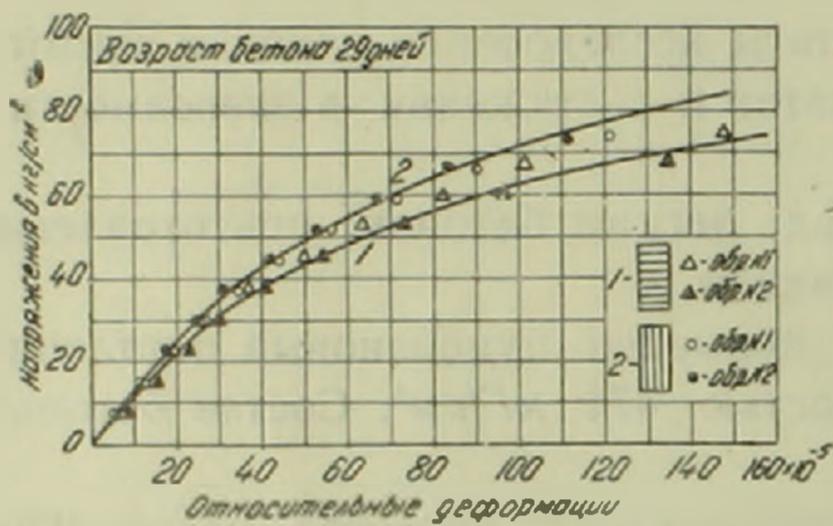
Прочностные характеристики бетона при сжатии приведены в табл. 1.

Таблица 1

Влияние анизотропии на прочность бетона при сжатии

Возраст бетона	Кубиковая прочность в кГ/см^2 , когда при испытании направление сжимающей силы по отношению к слоям бетона		Призменная прочность в кГ/см^2 , когда при испытании направление сжимающей силы по отношению к слоям бетона		$\frac{R}{R_{\text{пр}}}$	$\frac{R'_{\text{пр}}}{R_{\text{пр}}}$
	перпенд. (R)	парал. (R')	перпенд. ($R_{\text{пр.}}$)	парал. ($R'_{\text{пр.}}$)		
29 дней	123	122	83	93	0,99	1,12
1 год	177	167	100	125	0,94	1,25

Данные табл. 1 показывают, что анизотропия бетона оказывает существенное влияние на призменную прочность бетона. Благодаря анизотропии призменная прочность бетона по испытаниям призм параллельно слоям заметно больше, причем отношение $R'_{\text{пр.}}/R_{\text{пр.}}$ с увеличением возраста бетона увеличивается. На фиг. 1 представлены кривые полных деформаций призм, испытанных перпендикулярно и параллельно слоям при возрастах бетона 29 дней и 1 год. Деформации призм, испытанных перпендикулярно слоям, больше, чем деформации призм, испытанных параллельно слоям. При этом с увеличением возраста бетона разница деформаций увеличивается.



Фиг. 1. Влияние анизотропии на деформативность бетона при сжатии.

В табл. 2 приведены модули полных деформаций бетона по касательной при различных напряжениях и возрастах бетона.

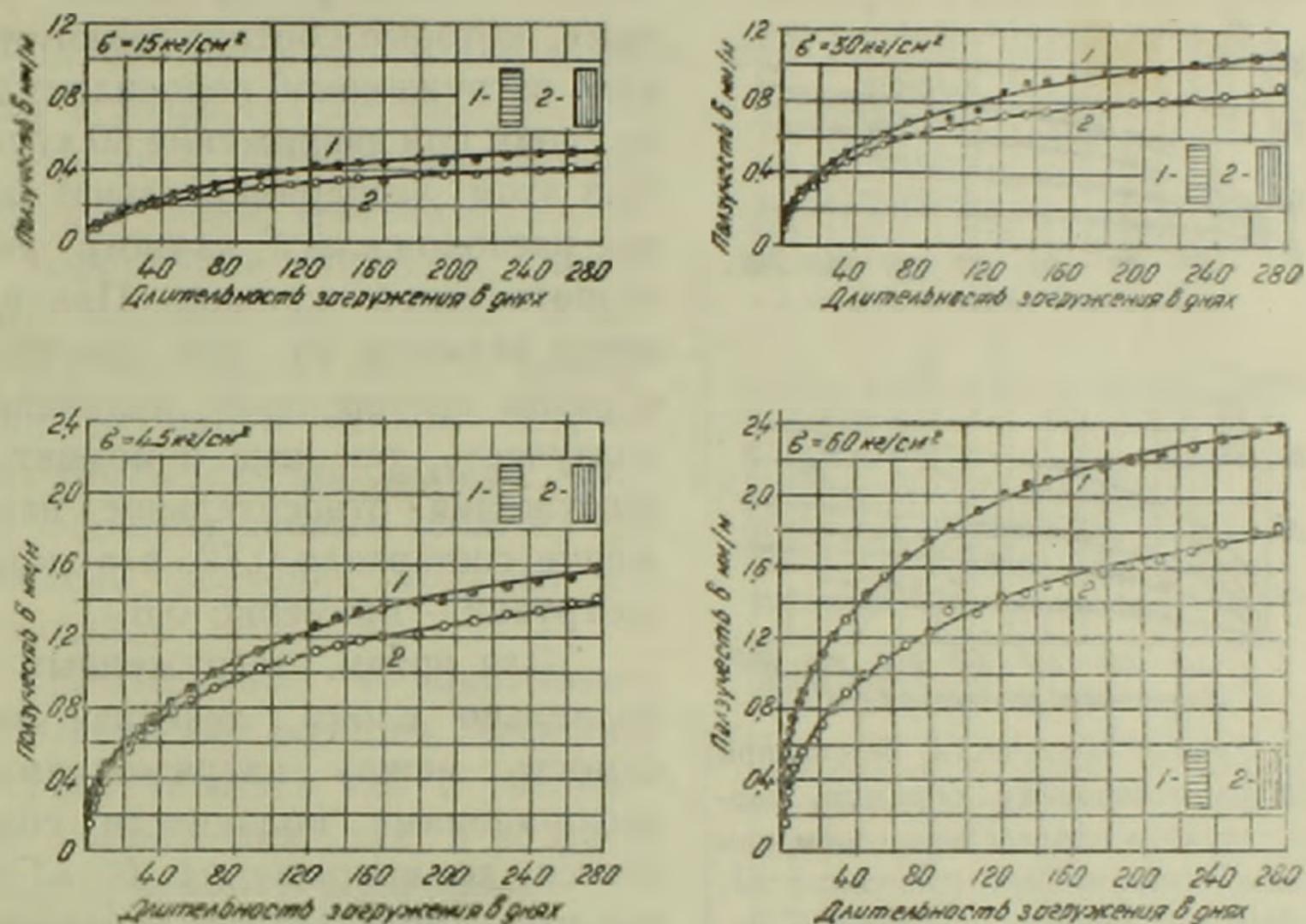
Таблица 2

Влияние анизотропии на модуль деформации бетона при сжатии

Возраст бетона	Направление сжимающей силы при испытании по отношению к слоям бетона	Модуль деформации бетона при сжатии по касательной в т/см^2 при напряжении (кГ/см^2)				Отношение модуля деформации призм, испытанных параллельно слоям, к модулю деформации призм, испытанных перпендикулярно слоям при напряжении (кГ/см^2)			
		0	30	60	80	0	30	60	80
		29 дней	Перпенд.	138	75	31	—	1,11	1,24
	Парал.	154	93	47	—				
1 год	Перпенд.	101	72	48	34	1,26	1,37	1,52	1,70
	Парал.	128	99	73	58				

Данные табл. 2 показывают, что модуль деформации бетона при испытании призм параллельно слоям значительно больше, чем перпендикулярно слоям. Отношение модулей увеличивается как с увеличением величины напряжения, так и возраста бетона к моменту испытания.

На основании опытных кривых ползучести (фиг. 2) ползучесть бетона при сжатии по испытаниям призм перпендикулярно слоям больше, чем по испытаниям призм параллельно слоям. При этом разница деформаций ползучести по абсолютному значению с увеличением напряжения возрастает.



Фиг. 2. Влияние анизотропии на ползучесть бетона при сжатии в зависимости от величины напряжения.

Как известно, при сжатии до определенного относительного напряжения связь между напряжениями и деформациями ползучести бетона выражается линейной зависимостью, а выше — криволинейной (4, 5).

Исследования автора показали, что относительное напряжение, при котором кончается область линейной ползучести и начинается область нелинейной ползучести, в большой мере зависит от возраста бетона к моменту загрузки бетона. Так, для возраста бетона 7 дней это относительное напряжение составляет 0,75, а для возраста больше 7 дней — 0,6 (5).

На верхнем графике фиг. 3 сплошными линиями представлены все экспериментальные кривые ползучести призм, испытанных перпендикулярно слоям, а на нижнем графике — параллельно слоям. Одновременно на этих графиках пунктирными линиями нанесены кривые ползучести, построенные по формулам:

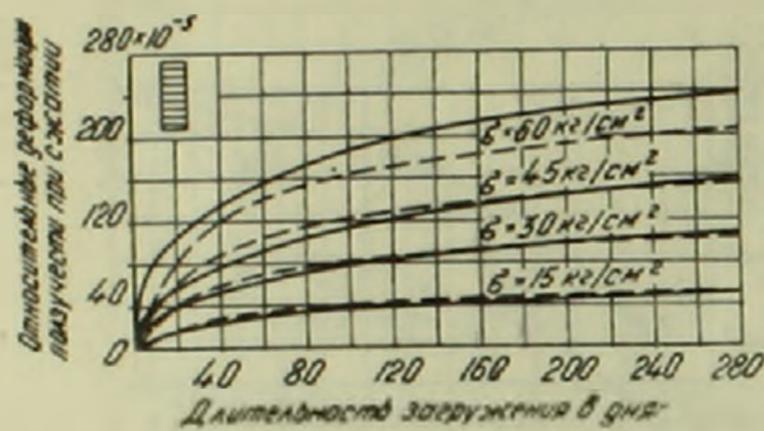
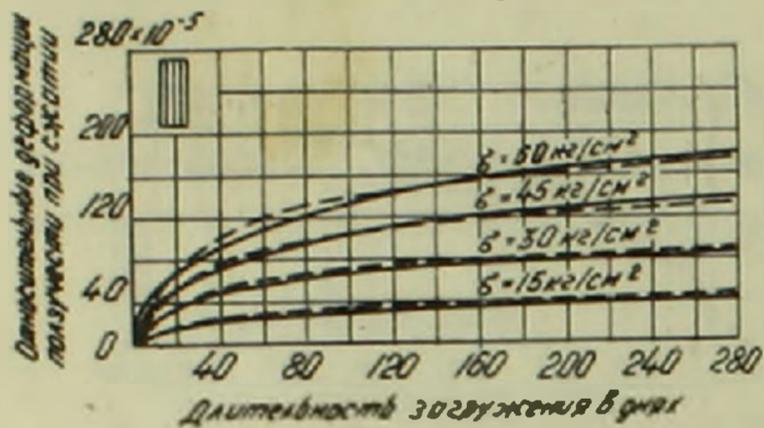
а) для образцов, испытанных перпендикулярно слоям

$$\epsilon_n = 58,5 [1 - 0,5 (e^{-0,05t} + e^{-0,005t})] \times \sigma \times 10^{-5}; \quad (1)$$

б) для образцов, испытанных параллельно слоям

$$\epsilon'_n = 50,0 [1 - 0,5 (e^{-0,05t} + e^{-0,005t})] \times \sigma \times 10^{-5}. \quad (2)$$

Как видно из фиг. 3, указанные зависимости вполне удовлетворительно описывают экспериментальные кривые ползучести. Только в одном случае получается заметное расхождение между теоретической и экспериментальной кривыми, которые соответствуют призмам, загруженным перпендикулярно слоям при напряжении 60 кг/см².



Фиг. 3. Кривые ползучести бетона при сжатии по испытаниям образцов перпендикулярно и параллельно слоям при различных напряжениях (сплошные линии—опытные кривые, пунктирные линии—теоретические кривые).

0,64, а в момент разгрузки — 0,48. Сравнение формул (1) и (2) показывает, что они отличаются лишь значениями предельных мер ползучести, отношение которых составляет 1,17.

Таким образом, степень влияния анизотропии на ползучесть бетона при сжатии в линейной области ползучести не зависит от величины напряжения. На основании фиг. 2 можно прийти к выводу, что влияние анизотропии на ползучесть бетона в нелинейной области ползучести больше, чем в линейной области и увеличивается с повышением напряжения.

В табл. 3 приведены прочностные характеристики бетона при осевом растяжении.

Из табл. 3 следует, что прочность бетона на растяжение, так же как и при сжатии, больше в образцах, испытанных параллельно слоям. Причем отношение R'_p/R_p с увеличением возраста бетона также увеличивается.

Таблица 3

Влияние анизотропии на прочность бетона при растяжении

Возраст бетона	Прочность бетона на растяжение в кг/см^2 , когда направление растягивающей силы при испытании по отношению к слоям бетона		$\frac{R'_p}{R_p}$
	перпенд. (R_p)	паралл. (R'_p)	
29 дней	7,0	8,9	1,27
1 год	7,0	10,6	1,51

На фиг. 4 представлены кривые деформаций бетона при растяжении в возрастах 29 дней и 1 год, на основании которых деформации образцов, испытанных перпендикулярно слоям, заметно превосходят деформации образцов, испытанных параллельно слоям. А поскольку это так, то модуль деформации бетона в первом случае будет соответственно меньше. Это ясно видно из данных табл. 4, где приведены значения модулей деформаций.

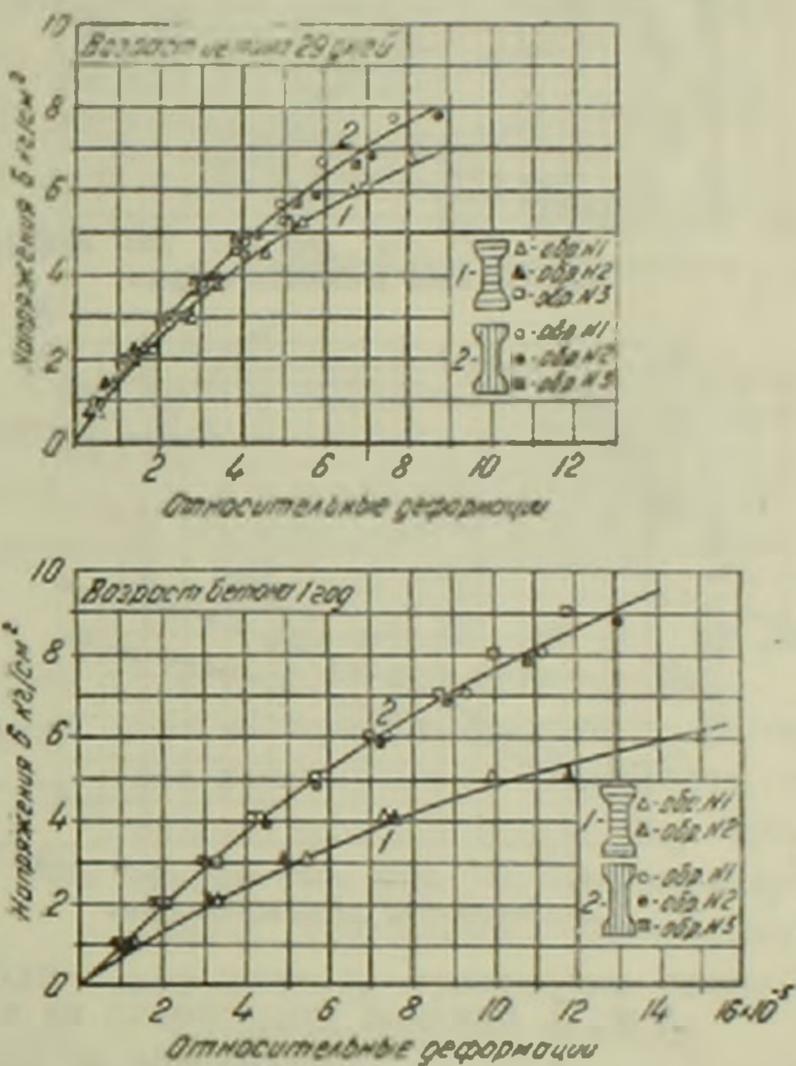
Данные табл. 4 показывают, что отношение модулей деформаций увеличивается как с увеличением напряжения, так и возраста бетона к моменту испытания.

Значения модулей деформаций при растяжении в годовом возрасте получились значительно меньше, чем в 29-дневном возрасте. Это необычное явление в данном случае имеет свои причины. Дело

в том, что цемент, примененный в наших опытах, был пуцолановый, а при этом, как известно, условия твердения приобретают первостепенное значение. Ввиду непостоянной и временами малой влажности помещения, где проводились наши опыты, такое явление надо было ожидать.

На фиг. 5 приведены опытные кривые ползучести бетона при растяжении, и, как видим, кривые образцов, испытанных перпендикулярно слоям, расположились выше кривых ползучести образцов, испытанных параллельно слоям.

Таким образом, и при растяжении ползучесть бетона в образцах, испытанных параллельно слоям, заметно меньше, чем в образцах, испытанных перпендикулярно слоям.

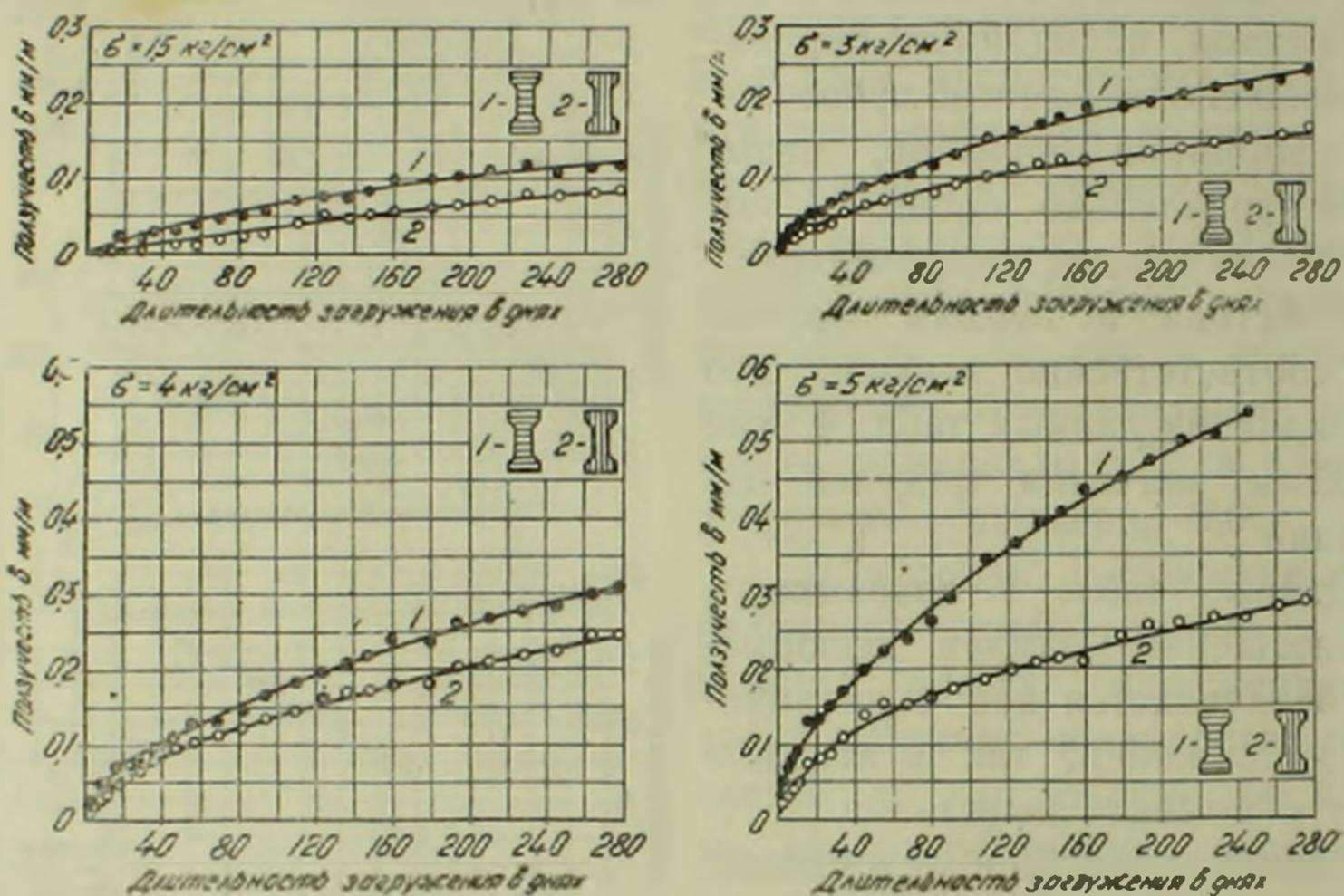


Фиг. 4. Влияние анизотропии на деформативность бетона при растяжении.



Влияние анизотропии на модуль деформации бетона при растяжении

Возраст бетона	Направление растягивающей силы при испытании по отношению к слоям бетона	Модель деформации бетона при растяжении по касательной при напряжении (кг/см ²)				Отношение модуля деформации восьмерок, испытанных параллельно слоям к модулю деформации восьмерок, испытанных перпендикулярно слоям при напряжении (кг/см ²)			
		0	2	4	6	0	2	4	6
29 дней	перпенд.	152	112	79	51	1,01	1,11	1,24	1,45
	парал.	156	125	98	74				
1 год	перпенд.	72	53	37	24	1,51	1,74	2,08	2,62
	парал.	109	92	77	63				



Фиг. 5. Влияние анизотропии на ползучесть бетона при растяжении в зависимости от величины напряжения

На основании опытов П. И. Васильева и Н. И. Катина при растяжении связь между напряжениями и деформациями ползучести линейна вплоть до относительного напряжения 0,9 (6, 7).

На фиг. 6 приведены два графика, из коих на верхнем сплошными линиями представлены все экспериментальные кривые ползучести бетона при растяжении для образцов, испытанных перпендикулярно слоям, а на нижнем графике — параллельно слоям. Одновременно на этих же графиках пунктирными линиями нанесены кривые ползучести по формулам:

а) для образцов, испытанных перпендикулярно слоям,

$$\varepsilon_n = 10,0 [1 - 0,5 (e^{-0,012t} + e^{-0,003t})] \times \sigma \times 10^{-5}; \quad (3)$$

б) для образцов, испытанных параллельно слоям,

$$\varepsilon'_n = 7,67 [1 - 0,5 (e^{-0,012t} + e^{-0,003t})] \times \sigma \times 10^{-5}. \quad (4)$$

Кривые, построенные по формулам (3) и (4), дают удовлетворительное совпадение с опытными кривыми ползучести. И в этом случае имеется заметное расхождение только между теоретическими и экспериментальными кривыми, которые соответствуют образцам, нагруженным перпендикулярно слоям при напряжении $5,0 \text{ кг/см}^2$.

Таким образом и при растяжении линейная зависимость между напряжениями и деформациями ползучести после определенного напряжения нарушается. Причем нарушение линейной зависимости, как и при сжатии, сперва наступает для образцов, испытанных перпендикулярно слоям. Следует отметить, что все три образца, нагруженных перпендикулярно слоям при $\sigma = 5,0 \text{ кг/см}^2$, в разное время дали разрыв. Разрыв первого образца произошел на 4 день, второго — 176 день и третьего — 262 день. Очевидно, разрушение первого образца на 4 день произошло из-за какого-либо незаметного дефекта. Разрушение же остальных двух образцов на 176 и 262 день, несомненно, является следствием того, что напряжение 5 кг/см^2 было больше предела длительной прочности бетона.

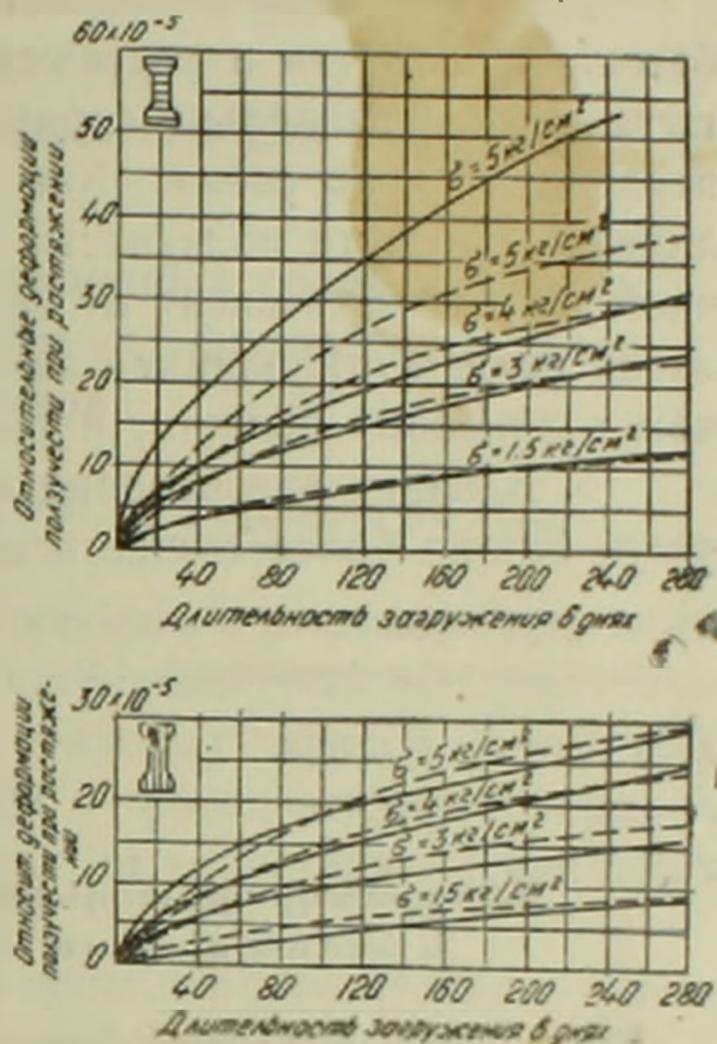
Сравнение формул (3) и (4) показывает, что они отличаются лишь значениями предельных мер ползучести бетона, отношение которых составляет 1,3.

Таким образом, в линейной области ползучести степень влияния анизотропии на ползучесть бетона при растяжении также не зависит от величины напряжения.

На основании фиг. 6 влияние анизотропии на ползучесть бетона при растяжении в нелинейной области больше, чем в линейной области, и увеличивается с увеличением напряжения. Из сравнения соответствующих опытных данных можно также заключить, что влияние анизотропии на ползучесть бетона более существенно при растяжении, чем при сжатии.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие основные выводы.

1. Анизотропия оказывает существенное влияние на призмную прочность и прочность бетона на растяжение. Призмная прочность и прочность на растяжение бетона при испытании образцов параллельно слоям заметно больше, чем при испытании образцов перпендикулярно слоям. С увеличением возраста бетона влияние анизотро-



Фиг. 6. Кривые ползучести бетона при растяжении по испытаниям образцов перпендикулярно и параллельно слоям при различных напряжениях (сплошные линии — опытные кривые, пунктирные линии — теоретические кривые).

пий на призмную прочность и прочность бетона на растяжение увеличивается.

2. Анизотропия оказывает существенное влияние на модуль деформации бетона при сжатии и растяжении. Модуль деформации бетона при сжатии и растяжении в образцах, испытанных параллельно слоям, заметно больше, чем в образцах, испытанных перпендикулярно слоям. Чем больше напряжение и возраст бетона, тем больше влияние анизотропии на модуль деформации бетона.

3. Анизотропия оказывает существенное влияние на ползучесть бетона при сжатии и растяжении. Ползучесть бетона в образцах, испытанных параллельно слоям, меньше, чем в образцах, испытанных перпендикулярно слоям. Как при сжатии, так и при растяжении в линейной области ползучести степень влияния анизотропии на ползучесть бетона не зависит от величины напряжения. В нелинейной области ползучести влияние анизотропии на ползучесть бетона больше, чем в линейной области, и увеличивается с увеличением напряжения.

4. Влияние анизотропии на прочность деформативность и ползучесть бетона более существенно при растяжении, чем при сжатии.

Институт математики и механики
Академии наук Армянской ССР

4. Ս. ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ

Անիզոտրոպիայի ազդեցությունը բետոնի սողի վրա սեղմման և ձգման դեպքում կախված լարման մեծությունից

Աշխատանքում հետազոտված է անիզոտրոպիայի ազդեցությունը բետոնի սողի վրա սեղմման և ձգման դեպքում կախված լարման մեծությունից: Հետազոտությունները ցույց են տվել, որ անիզոտրոպիան սեղմման և ձգման դեպքում էապես ազդում է ինչպես բետոնի ամրության, այնպես էլ դեֆորմացիաների մոդուլի վրա: Նմուշների շերտերին զուգահեռ փորձարկումների դեպքում ամրությունն ու դեֆորմացիաների մոդուլը զգալիորեն մեծ է, քան շերտերին ուղղահայաց փորձարկումների դեպքում: Անիզոտրոպիայի արագությունը մեծ է, որքան մեծ է բետոնի հասակը և լարումները:

Անիզոտրոպիան էապես ազդում է նաև բետոնի սողի վրա ինչպես ձգման, այնպես էլ սեղմման դեպքում: Նմուշների շերտերին ուղղահայաց փորձարկումների դեպքում սողըր մեծ է շերտերին զուգահեռ փորձարկումների համեմատությամբ: Եթե այս տարբերությունը գծային սողի սահմաններում կախված չէ լարումներից, ապա ոչ գծային սողի սահմաններում անիզոտրոպիայի ազդեցությունը մեծանում է լարումների մեծացման հետ:

Հետազոտությունները ցույց են տվել նաև, որ անիզոտրոպիայի ազդեցությունը բետոնի ամրության, դեֆորմատիկ հատկությունների և սողի վրա ձգման դեպքում միշտ ավելի մեծ է քան սեղման դեպքում:

Л И Т Е Р А Т У Р А

¹ К. С. Карапетян, ДАН АрмССР, т. 24, № 4 (1957). ² К. С. Карапетян, Известия АН АрмССР (серия физ.-мат. наук), 10, № 6, (1957). ³ К. С. Карапетян, Известия АН АрмССР (серия физ.-мат. наук), № 4 (1964). ⁴ К. С. Карапетян, Известия АН АрмССР (серия физ.-мат., ест. и техн. наук) 5, № 4 (1952). ⁵ К. С. Карапетян, Известия АН АрмССР (серия физ.-мат. наук), 12, № 4 (1959). ⁶ П. И. Васильев, Некоторые вопросы пластических деформаций бетона, Известия ВНИИГ, 48, 1953. ⁷ Н. И. Котин, Исследования ползучести бетона при высоких напряжениях, сборник НИИЖБ. Исследование свойств бетона и железобетонных конструкций, Госстройиздат, 1959.