

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

К. С. Карапетян

Ползучесть бетона при высоких напряжениях

Известно, что если напряжения бетона не превышают определенного предела— $0,3-0,4 R$ (R —предел прочности бетона,) то деформации ползучести при сжатии изменяются пропорционально напряжениям. С увеличением напряжения между напряжением и деформациями ползучести наблюдается более сложная зависимость [5, 6, 7]. В существующих методах расчета бетонных и железобетонных конструкций с учетом ползучести бетона в пределах напряжений $0,5 R$ принимается линейная зависимость между деформации ползучести и соответствующими напряжениями [1, 5, 7].

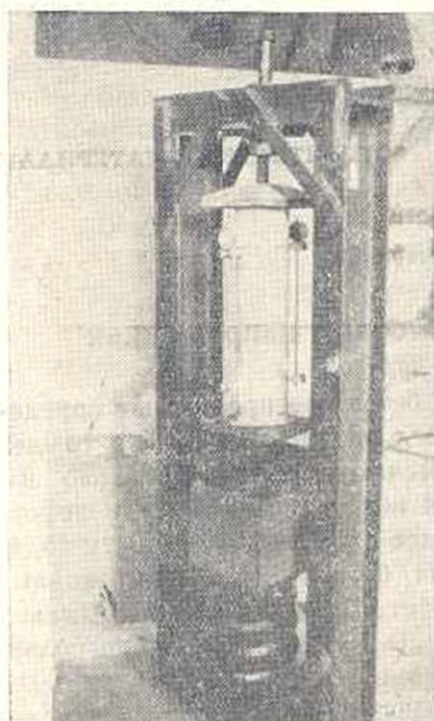
В настоящее время Н. Х. Арутюняном развита ранее предложенная им теория ползучести бетона для более широкого диапазона изменений напряжений, при котором линейная зависимость между величиной напряжения и деформацией ползучести нарушается [2].

Нами были поставлены опыты по исследованию ползучести тяжелого бетона при сжатии, причем исследовалась ползучесть бетона при относительно высоких напряжениях (до $0,7 R$) для трех возрастов бетона к моменту нагружения. Как известно, получить деформации ползучести бетона опытным путем в чистом виде не удастся. В нагруженных образцах замеряются деформации, которые представляют сумму деформаций усадки и ползучести. Чтобы определить деформации ползучести, параллельно, на ненагруженных образцах из того же бетона определяют усадочные деформации, что дает возможность путем исключения их из суммарных деформаций получить деформации ползучести.

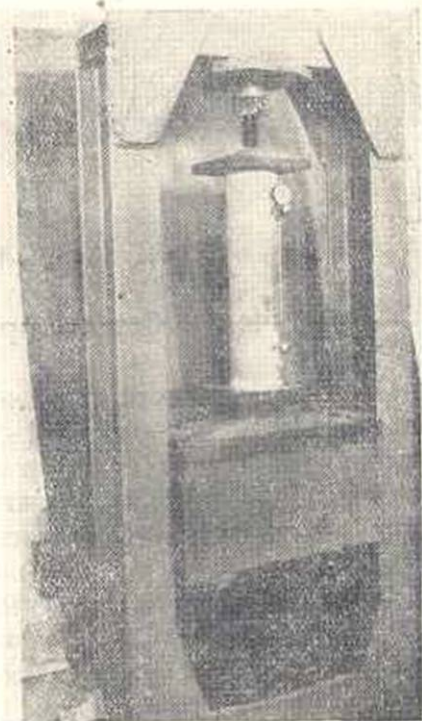
Для исследования ползучести бетона под длительной, постоянно сжимающей нагрузкой, были использованы специальные приспособления, показанные на фиг. 1 и 2.

Измерение деформаций цилиндрических бетонных образцов, как нагруженных, так и предназначенных для определения усадочных деформаций, проводилось с помощью индикаторов часового типа с удлиненной базой. Указанные приборы устанавливались на образцах стационарно с начала опытов на весь период длительного испытания. Каждый образец был снабжен двумя такими приборами.

Характеристика бетона приводится в таблице 1.



Фиг. 1.



Фиг. 2.

Таблица 1

Состав бетона по весу	Расход материалов на 1 м ³ бетона в кг				Объемный вес свеже уложенного бетона в т/м ³	Объемный вес бетона в насыщенном состоянии в т/м ³	Осадка конуса в см	Кубиковая прочность на сжатие в насыщенном состоянии в кг/см ²	Модуль упругости в насыщенном состоянии при $\sigma = 0,5 R_u$
	цемент	песок	щебень	вода					
1:2,54:3,53	272	692	965	241	2,17	2,075	3	146	130000

В качестве заполнителей для бетона были применены базальтовый щебень и кварцевый песок. В качестве вяжущего был применен портландцемент активностью 340 кг/см².

Бетонирование цилиндрических образцов, а также кубиков 20×20×20 см, производилось в металлических формах. Образцы освобождались от форм на третий день. Приготовление бетона производилось вручную, уплотнение — путем вибрирования. Образцы с момента освобождения от форм и в период последующего испытания хранились в помещении с $t = 21 \pm 7^\circ \text{C}$, $P = 50 \pm 10\%$.

Образцы были нагружены в возрасте 7, 14 и 32 дней. При этом в каждом возрасте образцы были установлены под длительную

нагрузку при относительных напряжениях¹ $\frac{\sigma}{R_n} = 0,25, 0,5$ и $0,7$ (R_n — цилиндрическая прочность бетона в соответствующем возрасте). Таким образом, относительное напряжение в момент нагружения было одинаковым для всех возрастов.

В таблице 2 приведены данные о количестве загруженных образцов в различных возрастах и при различных напряжениях.

Таблица 2

Возраст бетона в днях	Цилиндрическая прочность бетона в кг/см^2	Фактическое напряжение в кг/см^2	Относительное напряжение	Количество загруженных образцов
7	40	10	0,25	1
		20	0,50	2
		28	0,70	2
14	46	11,5	0,25	1
		23	0,50	2
		32	0,70	2
32	72	18	0,25	1
		36	0,50	2
		50	0,70	2

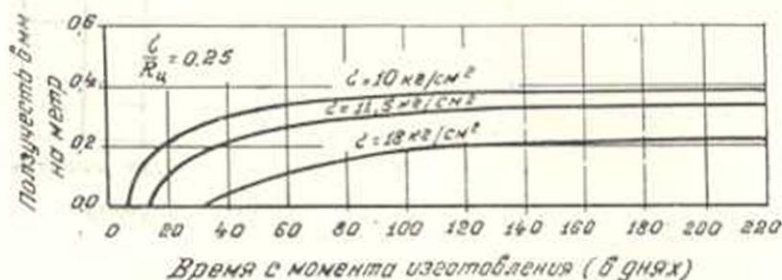
После шестимесячного наблюдения за деформациями образцов, исключением усадочных деформаций были получены кривые ползучести бетона.

Опыты различных исследователей [4, 5, 6] показывают, что с увеличением возраста бетона к моменту нагружения деформации ползучести уменьшаются. В этих опытах, обычно, бетон нагружался при одном и том же напряжении, независимо от его возраста. В силу этого относительное напряжение в момент нагружения было не одинаково для всех возрастов, а падало с увеличением возраста бетона к моменту нагружения. Поскольку в наших опытах исследовалась ползучесть бетона при различных возрастах, при напряжении до $0,7 R_n$, которое для возраста 32 дня составляло $\sigma = 50 \text{ кг/см}^2$, то, естественно, нельзя было загружать бетон в возрасте 7 и 14 дней тем же напряжением, так как указанное напряжение для возрастов 7 и 14 дней составляло больше их предела прочности на сжатие. Исходя из этого было принято одинаковое относительное напряжение для всех возрастов бетона к моменту нагружения.

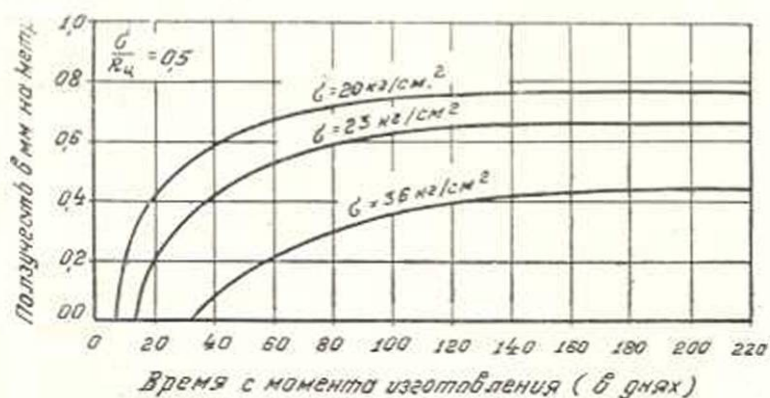
На фиг. 3 и 4 приведены полученные нами кривые ползучести бетона, загруженного в различных возрастах при напряжении $0,25$ и $0,5 R_n$, откуда видно, что чем моложе бетон к моменту нагружения, тем больше интенсивность нарастания деформации ползучести в начальный период загрузки. С увеличением длительности нагружения интенсивность нарастания ползучести падает. При этом, чем

¹ Относительным напряжением $\frac{\sigma}{R_n}$ нами условно названо отношение фактического сжимающего напряжения в бетоне σ к пределу прочности бетона R_n на сжатие к моменту нагружения образца.

моложе бетон к моменту нагружения, тем быстрее падает интенсивность нарастания деформации ползучести благодаря последующему интенсивному нарастанию прочности бетона и, в связи с этим, падению относительного напряжения во времени. По этой причине кривая ползучести бетона, нагруженного в возрасте 7 дней, достигает своего предельного значения раньше остальных.



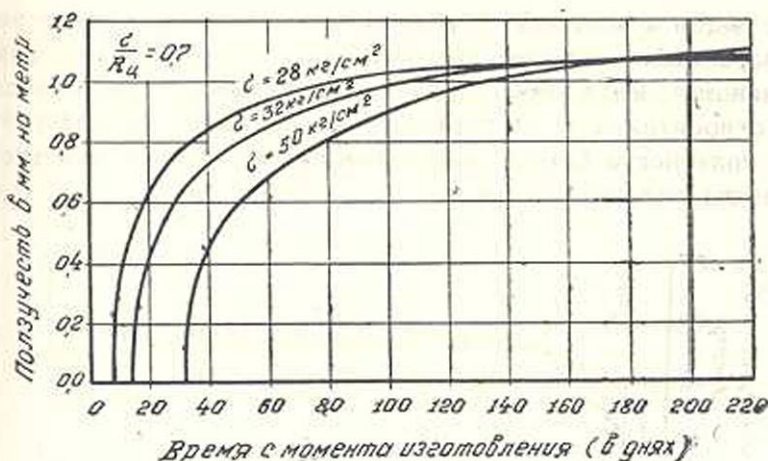
Фиг. 3



Фиг. 4

На фиг. 5 нанесены кривые ползучести бетонных образцов, нагруженных в тех же возрастах при напряжении $0.7 R_k$. Здесь также, чем моложе бетон, тем интенсивнее развиваются деформации ползучести в начальный период нагружения и тем быстрее достигают они своего предельного значения. В начальный период нагружения эти кривые почти параллельны, но далее, постепенно приближаясь, пересекают друг друга. В итоге, после определенной длительности нагружения, кривая ползучести бетона, нагруженного в возрасте 32 дней, располагается выше остальных, кривая ползучести в возрасте 7 дней — ниже всех, кривая ползучести в возрасте 14 дней занимает промежуточное положение.

Существуют различные мнения о механизме ползучести бетона. Одни авторы ползучесть бетона в основном объясняют вязкостью

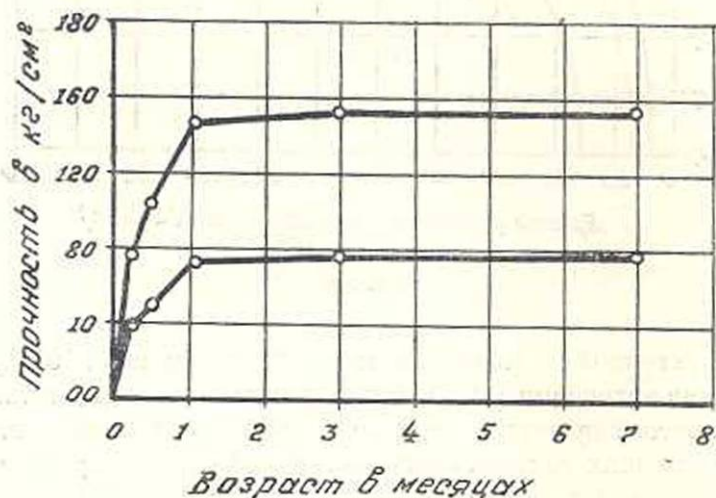


Фиг. 5

гелевой структурной составляющей цементного камня [7, 10], другие — капиллярными явлениями [9]. Некоторые исследователи считают, что ползучесть бетона является следствием обоих этих факторов. Кроме этого, при высоких напряжениях — выше 0,55–0,6 от предела прочности бетона, — в бетоне появляются разрывы, микротрещины, развитие которых также приводит к ползучести [3, 8]. О. Я. Берг на основании своих опытов пришел к выводу, что основной причиной ползучести бетона при высоких ступенях нагрузки является появление и развитие микрощелей [3]. Конечно, это положение верно при кратковременных испытаниях бетона, так как развитие деформаций ползучести за счет вязкости геля и капиллярных явлений в большей мере зависит от длительности нагружения и возраста бетона к моменту приложения нагрузки. При этом следует полагать, что чем больше возраст бетона к моменту длительного нагружения, тем больше будет деформация ползучести за счет появления и развития микротрещин и меньше — за счет вязкости геля и капиллярных явлений. Хотя наши опыты и не сопровождались соответствующими наблюдениями за развитием микротрещин на поверхности нагруженных бетонных образцов, однако результаты этих опытов приводят нас к этому выводу. Дело в том, что деформации ползучести бетона, нагруженного в старом возрасте напряжением более 0,55–0,6 R_n , в основном обусловлены появлением и развитием микротрещин благодаря незначительному росту прочности бетона, и, в связи с этим, незначительного падения относительного напряжения в процессе длительного нагружения. По этой же причине, при напряжениях, близких к пределу прочности бетона, развитие микротрещин может привести к разрушению бетона.

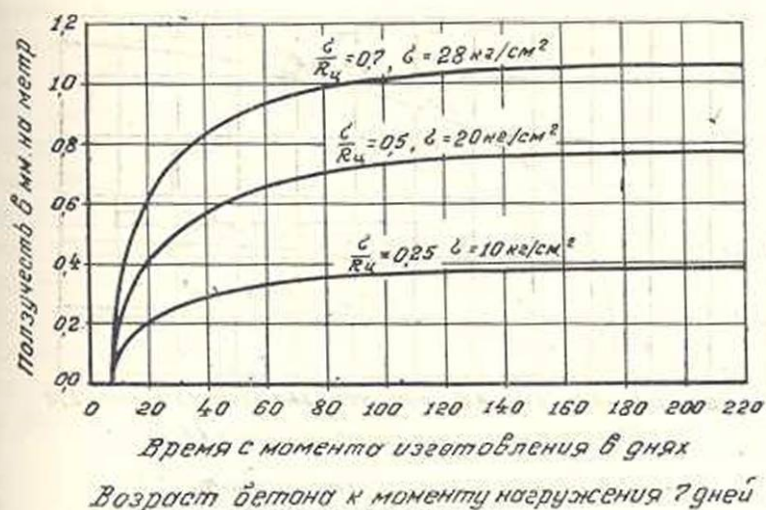
Совсем иначе обстоит дело при нагружении бетона длительной нагрузкой в молодом возрасте, напряжением выше 0,55–0,6 R_n .

В этом случае деформации бетона гораздо в большей мере зависят от вязкости геля и капиллярных явлений. А такой фактор, как развитие макротрещин имеет существенное значение лишь в начальный период загрузки, так как благодаря интенсивному нарастанию прочности бетона после нагружения, относительное напряжение в бетоне быстро падает. Это наглядно видно из фиг. 6, на которой приведе-

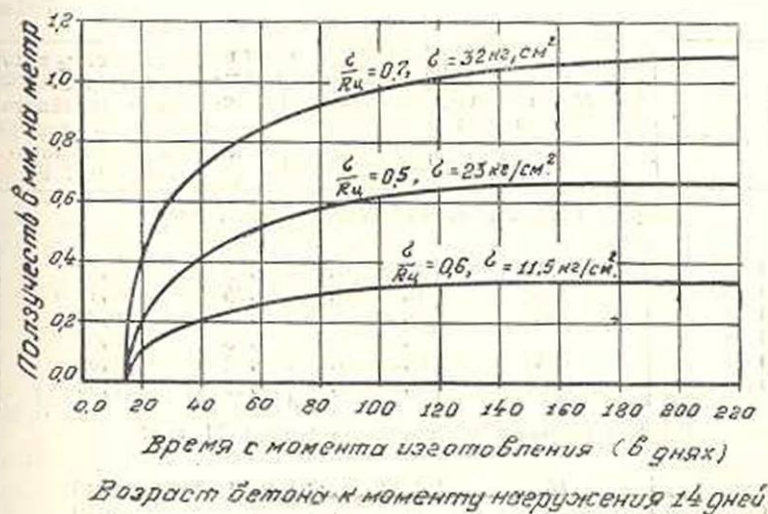


Фиг. 6

ны две кривые, из коих верхняя—кривая нарастания кубиковой прочности бетона во времени, а нижняя—кривая нарастания цилиндрической прочности бетона. Когда бетон с 7-дневного возраста достигает месячного возраста, прочность его почти удваивается, в то время как после месячного возраста нарастание прочности незначительно. Таким образом, благодаря нарастанию прочности бетона, нагруженного в молодом возрасте, относительное напряжения соответственно быстро падает и тем самым образование новых трещин и развитие старых должно прекратиться. Появление новых трещин, повидимому, прекратится в тот момент, когда относительное напряжение, благодаря росту прочности бетона, станет меньше $0,55-0,6 R_n$, так как при этом обычно начинают появляться трещины ввиду достижения в бетоне предельной деформации при растяжении, которое сопровождается соответствующими поперечными деформациями [3]. С наступлением этого момента дальнейшие деформации ползучести бетона будут в основном обусловлены вязкостью гелевой структурной составляющей цементного камня, а также капиллярными явлениями. На фиг. 7, 8, 9 приведены кривые ползучести бетона при напряжениях 0,25, 0,5 и 0,7 от предела прочности бетона в каждом возрасте. В таблице 3 приведены деформации ползучести при различных возрастах бетона к моменту нагружения и различных значениях длительности нагружения и напряжения. Как видно из таб-

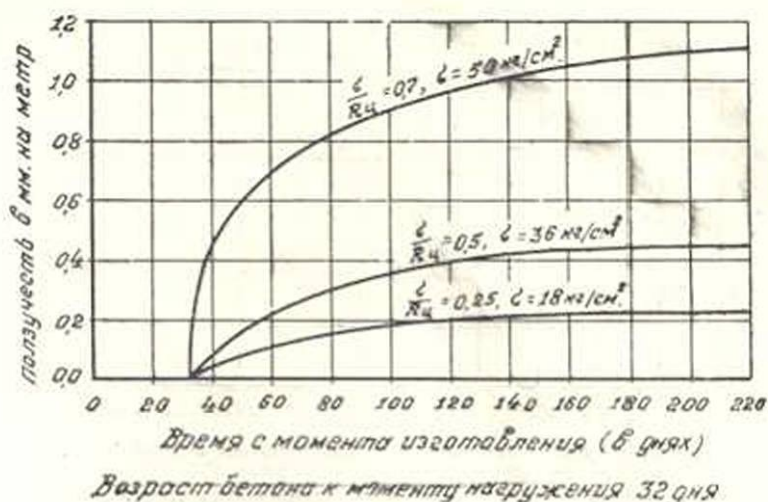


Фиг. 7



Фиг. 8

лины, для бетона в возрасте 7 и 14 дней при $0 \leq \frac{\sigma}{R_u} \leq 0.5$ имеется линейная зависимость между деформациями и соответствующими напряжениями. Линейная зависимость при $0.7 R_u$ нарушается, в особенности, в начальный период нагружения. В дальнейшем, по мере увеличения длительности нагружения, эта нелинейность постепенно уменьшается. В результате этого, для бетона, нагруженного в возрасте 7 дней, наступает момент (при длительности нагружения примерно 3 месяца), после которого наблюдается линейная зависимость даже



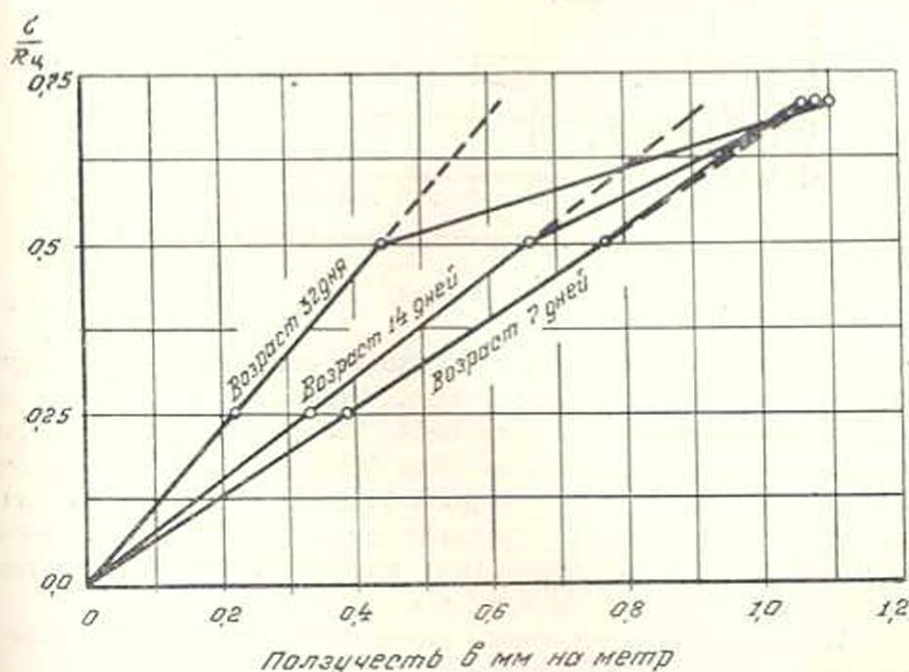
Фиг. 9

Таблица 3

Возраст бетона с момента изготовления образцов в днях	Длительность нагружения в днях	Ползучесть ε_2 в мм на м по кривым ползучести при напряжениях			Ползучесть ε_2 в мм на м в предположении линейного изменения деформации до напряжения $0,7 R_{ch}$	$\varepsilon_1 - \varepsilon_2$ в мм на м
		$0,25 R_{ch}$	$0,5 R_{ch}$	$0,7 R_{ch}$ ε_1		
Возраст бетона к моменту нагружения 7 дней						
20	13	0,20	0,40	0,62	0,57	0,05
30	23	0,25	0,50	0,75	0,71	0,04
40	33	0,29	0,58	0,83	0,80	0,03
60	53	0,33	0,66	0,93	0,92	0,01
100	93	0,36	0,72	1,02	1,02	0
220	213	0,38	0,76	1,06	1,08	0,02
Возраст бетона к моменту нагружения 14 дней						
30	16	0,17	0,34	0,61	0,46	0,15
40	26	0,21	0,42	0,72	0,59	0,13
60	46	0,26	0,52	0,84	0,72	0,12
100	86	0,31	0,62	0,98	0,87	0,11
220	206	0,33	0,66	1,08	0,93	0,15
Возраст бетона к моменту нагружения 32 дня						
40	8	0,04	0,08	0,43	0,11	0,33
60	28	0,11	0,22	0,67	0,29	0,38
100	68	0,18	0,36	0,89	0,49	0,40
220	188	0,22	0,44	1,10	0,62	0,48

при напряжении $0,7 R_{ch}$. Уменьшение степени нелинейности с увеличением времени нахождения бетона под нагрузкой в основном является следствием уменьшения во времени относительного напряжения благодаря росту прочности бетона и, в связи с этим, уменьшения де-

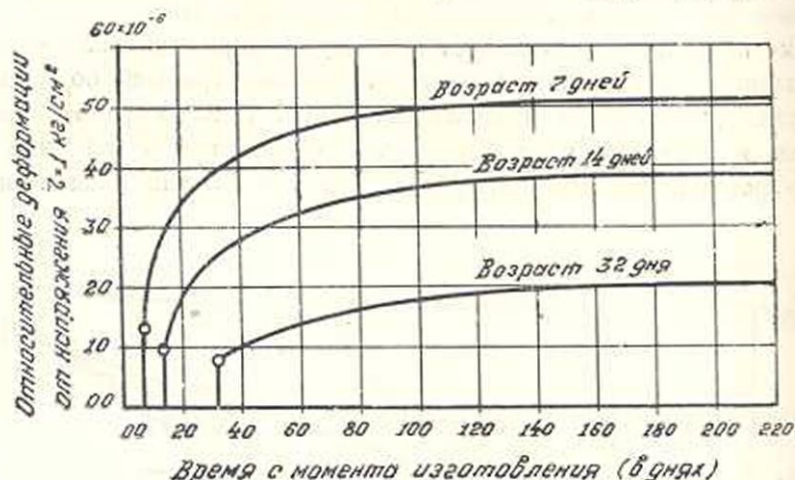
формаций от образования и развития микротрещин. Иная картина получается при нагружении бетона в месячном возрасте (см. таблицу 3). Здесь также в пределах напряжений $0,5 R_n$ наблюдается линейная зависимость между деформациями и напряжениями. Однако при напряжении $0,7 R_n$ линейность сильно нарушается. При этом с увеличением длительности нагружения степень нелинейности возрастает. Это вполне закономерно, так как ввиду незначительного роста прочности бетона после месячного возраста, относительное напряжение падает незначительно, а поэтому деформации ползучести, обусловленные образованием и развитием микротрещин, во времени не затухают, а наоборот, продолжают расти. Таким образом, чем старше бетон к моменту нагружения, тем существеннее влияние указанного фактора на его ползучесть. На фиг. 10 нанесены кривые из-



Фиг. 10

менения ползучести бетона в зависимости от напряжения при длительности нагружения 190 дней. Кривые соответствуют возрасту бетона в момент нагружения 7, 14 и 32 дня. Из рассмотрения этих кривых видно, что линейная зависимость между деформациями и напряжениями, независимо от возраста бетона, имеет место при напряжениях, не превышающем $0,5 R_n$. Далее, с увеличением напряжения, линейность нарушается тем сильнее, чем больше возраст бетона к моменту нагружения. Степень нелинейности отчетливо видна на фигуре, где условно, пунктирными линиями, линейность распространена до предела напряжений $0,7 R_n$.

На фиг. 11 приведены кривые ползучести бетона с соответствующими мгновенно упругими деформациями при $\sigma = 1 \text{ кг/см}^2$ исходя из линейной зависимости между деформациями и напряжениями в пределах до $0,5 R_n$. Рассматривая кривые ползучести бетона от единичного напряжения, т. е. кривые меры ползучести, мы замечаем, что после достижения бетоном возраста 2 месяцев, эти кривые разных возрастов загрузки параллельны друг другу. Дефор-



Фиг. 11

мации ползучести на много превосходят соответствующие упругие деформации при нагружении бетона. Отношение деформаций ползучести при длительности нагружения 190 дней к соответствующим упругим деформациям для возраста бетона к моменту нагружения 7 дней составляет 3,1, для возраста 14 дней—3,0 и для возраста 32 дня—1,5. Таким образом, с увеличением возраста бетона к моменту нагружения отношение деформаций ползучести к соответствующим упругим деформациям уменьшается.

На основании проведенных экспериментальных исследований могут быть сделаны следующие выводы:

1. При относительном напряжении менее 0,5:

а) опытами подтверждается линейная зависимость между деформациями ползучести и соответствующими сжимающими напряжениями;

б) отношение деформаций ползучести к мгновенным деформациям, при одинаковой длительности загрузки, уменьшается с увеличением возраста бетона к моменту нагружения.

2. При относительном напряжении 0,7:

а) деформации ползучести бетона, нагруженного в молодом возрасте (7 дней), по сравнению с деформациями бетона, нагруженного в более позднем возрасте (32 дня) скорее достигают своего предельного значения;

б) между деформациями и напряжениями имеется нелинейная зависимость; отклонение от линейного закона увеличивается с увеличением возраста бетона к моменту нагружения.

Институт строительных материалов и
сооружений АН Армянской ССР

Поступило 18 XII 1952

ЛИТЕРАТУРА

1. Арутюнян Н. А. Теория упругого напряженного состояния бетона с учетом ползучести. ПММ, том XIII, вып. 6, 1949.
2. Арутюнян Н. А. Некоторые вопросы теории ползучести. ДАН Армянской ССР, том XII, № 3, 1951.
3. Берг О. Я. К вопросу о прочности и пластичности бетона. ДАН СССР, том XII, № 4, 1950.
4. Карапетян К. С. О ползучести туфобетона. Известия АН Армянской ССР (серия ФМЕТ наук), том V, № 4, 1952.
5. Столяров Я. В. Введение в теорию железобетона. Стройиздат, 1941.
6. Сатакин А. В. Ползучесть бетона. Сборник „Прочность, упругость и ползучесть бетона“ под ред. проф. Н. М. Белыева. Стройиздат Наркомстроя, 1941.
7. Улицкий И. И. Ползучесть бетона. Гостехиздат Украины, 1948.
8. Улицкий И. И. Расчет бетонных и железобетонных арочных и комбинированных конструкций с учетом длительных процессов. Гостехиздат Украины, 1950.
9. Фрейсине Е. Переворот в технике бетона. ОНТИ, 1938.
10. Шейкин А. Е. К вопросу прочности, упругости и пластичности бетона. Труды МИИТ, вып. 69, Трансжелдориздат, 1946.

Կ. Ս. Նարարեղյան

ԲԵՏՈՆԻ ՍՈՂՔԸ ԲԱՐՁՐ ԼԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ԴԵՓՈՐՄԱՆ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հոդվածում բերված են ծանր բետոնի սողքի էքսպերիմենտալ հետազոտությունների արդյունքները՝ բետոնի ամրության սահմանի 0,25, 0,5 և 0,7 մասերը կազմող լարումների դեպքում:

Պարզված է, որ

1. 0,5-ից ցածր հարաբերական լարման դեպքում՝

ա) փորձերով հաստատվում է գծային կախումը սողքի դեֆորմացիաների և սեղմման համապատասխան լարումների միջև:

բ) բեռնավորման միևնույն անողուն լարումների դեպքում սողքի և ակնթարթային դեֆորմացիաների հարաբերությունն այնքան ավելի փոքր է, որքան մեծ է բետոնի հասակը բեռնավորման մոմենտին:

2. 0,7 հարաբերական լարման դեպքում՝

ա) Վաղ հասակում (7 օր) բեռնավորված բետոնի սողքի դեֆորմացիաները, ավելի ուշ հասակում (32 օր) բեռնավորված բետոնի սողքի դեֆորմացիաների համեմատությամբ ավելի շուտ են հասնում իրենց սահմանային արժեքին:

բ) դեֆորմացիաների ու լարումների միջև գոյություն ունի ոչ-գրգռային կախում: Շեղումը գծային օրենքից այնքան ավելի մեծ է, որքան մեծ է բետոնի հասակը բեռնավորման մոմենտին: