

ТЕОРИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ

К. С. Карапетян

Влияние масштабного фактора на ползучесть
бетона при сжатии и растяжении

(Представлено академиком АН Армянской ССР Н. Х. Арутюняном 7/XII 1953)

Влияние масштабного фактора на ползучесть бетона мало исследовано. На основании существующих немногочисленных исследований ползучесть бетона при сжатии, как и усадка, с увеличением размеров бетонного элемента уменьшается. Поэтому расчетные величины деформаций усадки и ползучести бетона должны устанавливаться в зависимости от размеров сечений конструкций.

В силу технических затруднений в лабораторных условиях обычно усадка и ползучесть определяются на образцах сравнительно малых сечений. Поэтому получаемые при этом данные применительны только к элементам конструкций таких же сечений. Учитывая необходимость оценки усадки и ползучести бетона для конструкций любых размеров, нами ⁽¹⁾ был предложен обоснованный метод. Он был применен И. И. Улицким, который путем обобщения опытных данных различных исследователей установил коэффициенты масштабности усадки и ползучести бетона ⁽²⁾.

Цель настоящей работы заключалась в исследовании влияния масштабного фактора на ползучесть бетона при сжатии и растяжении.

Опыты были поставлены над легким бетоном, приготовленным на песке и щебене из литонидной пемзы. В качестве вяжущего был применен пуцолановый портландцемент Араратского завода активностью 471 кг/см². Состав бетона по весу 1 : 1.85 : 3.0, В/Ц = 1.

Влияние масштабного фактора на ползучесть бетона при сжатии и растяжении исследовалось на призматических образцах и восьмерках сечениями 7 × 7, 10 × 10, 15 × 15 и 20 × 20 см. Высота всех призм и восьмерок сечениями 7 × 7 и 10 × 10 составляла 60 см, а остальных восьмерок — 70 см.

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

Образцы бетонировались в горизонтальных металлических формах. Всего было приготовлено 36 призматических образцов и 36 вось-

мерок. Для определения кубиковой прочности были также приготовлены кубики размерами ребер 7, 10, 15 и 20 см.

Нагружение образцов длительной нагрузкой было осуществлено при возрасте бетона 28 дней. Всего под длительную нагрузку были установлены 12 призм и 12 восьмерок. На таком же количестве образцов-близнецов определялись усадочные деформации. Напряжение длительно нагруженных призм составляло 20 кг/см^2 , а в восьмерках — 4 кг/см^2 .

Наблюдение за деформациями нагруженных и ненагруженных образцов продолжалось 260 дней.

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 — $\rho = 62 \pm 12\%$.

Перед загрузкой образцов длительной нагрузкой 12 призм и 12 восьмерок были испытаны для определения призмной прочности, предела прочности при осевом растяжении и модуля деформации бетона в зависимости от размеров образца. Испытывались также кубики размерами ребер 7, 10, 15 и 20 см.

Испытания призм и восьмерок производились ступенчатым нагружением образцов и измерением деформаций после каждой ступени нагрузки, составляющих примерно 0,1 от предела прочности бетона. Деформации измерялись до нагрузки 0,8—0,9 от предела прочности бетона.

Прочностные характеристики бетона приведены в табл. 1.

Таблица 1

Размеры сечения образцов в см	R в кг/см^2	$\frac{R_{20}}{R}$	$R_{\text{пр.}}$ в кг/см^2	$\frac{R_{\text{пр.}}}{R}$	R_p в кг/см^2	$\frac{R_{\text{пр.}}}{R_p}$	$\frac{R_p}{R}$
7 × 7	177	0,90	135	0,76	12,5	0,73	0,07
10 × 10	180	0,88	125	0,70	10,4	0,88	0,063
15 × 15	165	0,96	138	0,83	8,3	1,11	0,05
20 × 20	159	1,00	128	0,80	9,2	1,0	0,055

Как видно из табл. 1, несмотря на заметное изменение отношения h/a (h — высота призмы, a — размер стороны сечения призмы), призмные прочности разных размеров образцов получились практически одинаковыми. Что касается предела прочности бетона при осевом растяжении, то он в большей мере зависит от размеров сечения образца. Чем больше сечение образца, тем меньше прочность бетона на растяжение. На основании данных табл. 1 отношение предела прочности бетона на растяжение к кубиковой прочности с увеличением сечения образца уменьшается. Модули деформации бетона месячного возраста приведены в табл. 2.

Таблица 2

Размеры сечения образцов в см	Модуль деформации при сжатии в тыс. кг/см ²					Модуль деформации при растяжении в тыс. кг/см ²				
	по касательной при $\frac{\sigma}{R_{пр}}$				по хорде при $\frac{\sigma}{R_{пр}}=0,5$	по касательной при $\frac{\sigma}{R_p}$				по хорде при $\frac{\sigma}{R_p}=0,5$
	0	0,25	0,5	0,75		0	0,25	0,5	0,75	
7×7	155	115	80	52	112	134	120	106	93	118
10×10	162	130	102	78	129	173	138	107	79	136
15×15	160	123	91	64	121	214	163	119	82	159
20×20	160	122	90	62	120	175	154	134	116	151

Как следует из табл. 2, модуль деформации по хорде при $\frac{\sigma}{R_{пр}} = 0,5$ равен модулю деформации по касательной при $\frac{\sigma}{R_{пр}} = 0,25$. Причем сказанное имеет место независимо от размеров образца и притом как при сжатии, так и при растяжении.

В наших опытах призмные прочностные разных размеров призм получились практически одинаковые. Данные табл. 2 показывают, что и модуль деформации бетона при сжатии не зависит от размеров сечения призм. Между тем анализ данных табл. 1 и 2 показывает, что при растяжении как прочность, так и модуль деформации бетона в большей мере зависят от размеров сечения образца. С увеличением сечения образца предел прочности бетона на растяжение уменьшается, а модуль деформации возрастает.

На фиг. 1 приведены экспериментальные кривые ползучести бетона при сжатии, на основании которых ползучесть бетона с увеличением размеров сечения образца уменьшается. Так, например, как это следует из фиг. 1, ползучесть бетона при призмах сечением 20×20 см в два раза меньше, чем при призмах сечением 7×7 см.

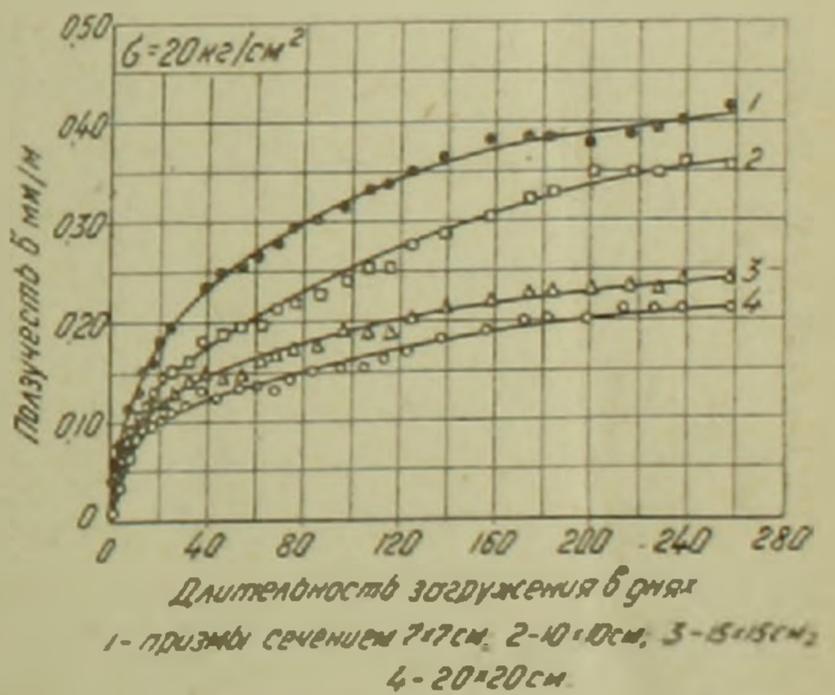
Как известно, аналитическое выражение меры ползучести бетона, которое предложил Н. Х. Арутюнян, имеет следующий вид

$$C(t, \tau) = \varphi(\tau) f(t - \tau). \quad (1)$$

где $\varphi(\tau)$ — функция старения, $f(t - \tau)$ — функция длительности нагружения (τ).

В раскрытом виде формула (1) пишется так

$$C(t, \tau) = \left(C_0 + \frac{A}{\tau} \right) [1 - e^{-\gamma(t-\tau)}]. \quad (2)$$



Фиг. 1.

Достоинства указанной формулы, которая весьма просто отражает основные явления ползучести бетона во времени, общеизвестны. Однако, как утверждают некоторые исследователи, формула (2) не всегда хорошо описывает опытные кривые ползучести, в особенности в начальный период опытов (4, 5). Чтобы устранить указанный недостаток, для функции $C(t, \tau)$ был предложен ряд новых выражений. Авторы этих предложений пошли по пути осложнения выражения меры ползучести. Так, в рекомендованном Л. В. Яшиным выражении меры ползучести бетона число опытных параметров доходит до 7 (5).

Н. Х. Арутюнян считает, что иногда для более лучшего описания опытных кривых ползучести может оказаться необходимым в выражениях $\varphi(\tau)$ и $f(t - \tau)$ сохранить не два, а больше членов ряда или даже для $\varphi(\tau)$ принять другой вид зависимости (1).

Наши исследования показали, что для лучшего описания кривых ползучести выражение меры ползучести (2) с некоторым изменением следует представить в следующем виде

$$C(t, \tau) = \left(C_0 + \frac{A}{\tau} \right) [1 - 0.5 (e^{-\tau_1(t-\tau)} + e^{-\tau_2(t-\tau)})]. \quad (3)$$

В таком виде выражение становится весьма гибким и лишено того недостатка, о котором указывалось выше. Такое выражение $C(t, \tau)$ нами ранее применялось для описания кривых ползучести бетона при кручении и растяжении, и во всех случаях получалось хорошее соответствие с опытными данными.

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

$$C(t, \tau, a) = \varphi(\tau, a) f(t - \tau), \quad (4)$$

где a — наименьший размер поперечного сечения бетонного элемента.

Для описания экспериментальных кривых ползучести бетона, приведенных на фиг. 1, получена следующая зависимость

$$\varepsilon_n = (t, 28, a) = \left(0.006 + \frac{0.13}{a} \right) [1 - 0.5 (e^{-0.005t} + e^{-0.05t})] \times 20, \quad (5)$$

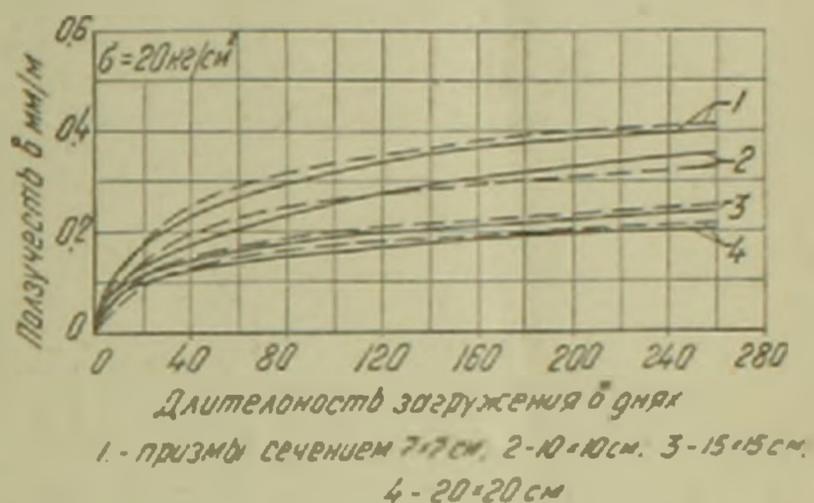
где

$$\varphi(28, a) = 0.006 + \frac{0.13}{a}. \quad (6)$$

Рассматривая выражение (6), нетрудно заметить, что $\varphi(28, \infty) = 0.006$. Таким образом, 0,006 представляет предельную меру ползучести бетона для бетонного массива с размерами, равными бесконечности при $\tau = 28$ дней. Однако с практической точки зрения уже при $a > 200$ см влияние масштабного фактора настолько незначительно, что вторым членом $\varphi(\tau, a)$ можно пренебречь.

На фиг. 2 нанесены опытные кривые ползучести и кривые по формуле (5) (пунктиром), которые дают хорошую сходимость с опытными кривыми.

На фиг. 3 приведены экспериментальные кривые ползучести бетона при растяжении, которые показывают, что в данном случае нет определенной закономерности во влиянии масштабного фактора на ползучесть бетона, как это имело место при сжатии. Деформации образцов разных размеров отличаются незначительно лишь в начальный период опытов, а в дальнейшем приобретают практически одинаковые значения. На основании этих опытов скорее можно прийти к выводу, что масштабный фактор не оказывает влияния на ползучесть бетона при растяжении. Однако, чтобы убедиться, действительно ли это так, несколько детальнее проанализируем результаты этих опытов.



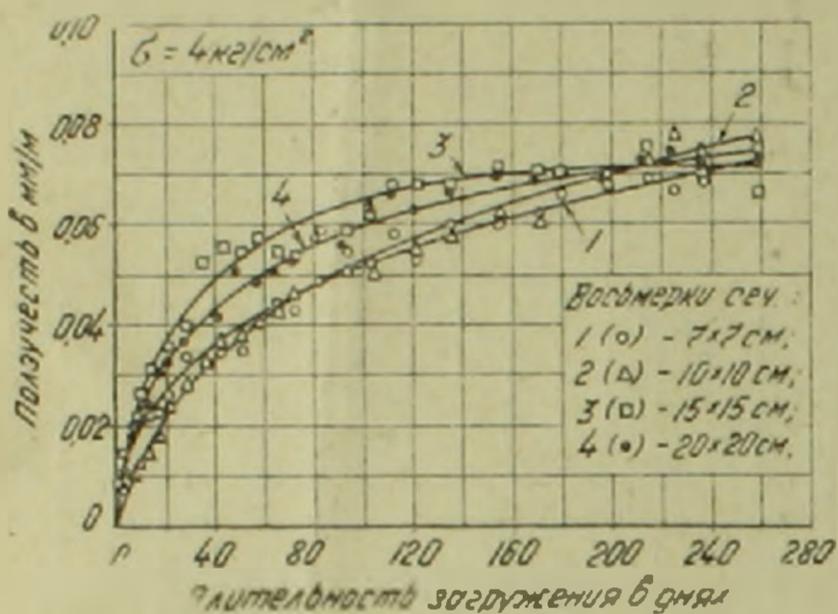
Фиг. 2.

До длительности нагружения 180 дней кривые ползучести образцов разных сечений в отношении друг друга расположились (кроме кривой 4) так, что чем больше сечение образца, тем больше деформации ползучести. Такое расположение кривых, конечно, никак нельзя отнести к влиянию масштабного фактора, а скорее это является следствием неодинакового относительного напряжения в образцах разных сечений как в момент их длительного нагружения, так и в процессе нахождения их под нагрузкой. Неодинаковость относительных напряжений обусловлена тем, что все образцы разных сечений были нагружены численно одинаковым напряжением (4 кг/см^2), а их пределы прочности на растяжение отличались (табл. 1).

Относительные напряжения в момент нагружения в восьмерках сечениями 7×7 , 10×10 , 15×15 и $20 \times 20 \text{ см}$ соответственно составляли 0,32; 0,38; 0,48 и 0,43. Эти данные показывают, что чем больше сечение образца, тем больше было относительное напряжение. Исключение составляет лишь относительное напряжение в восьмерках сечением $20 \times 20 \text{ см}$, которое должно было быть наибольшим, однако фактически получилось меньше, чем относительное напряжение в восьмерках сечением $15 \times 15 \text{ см}$. Такое отклонение могло быть вызвано тем, что восьмерки сечением 7×7 , 10×10 и $15 \times 15 \text{ см}$ были приготовлены из одного замеса бетона, а восьмерки сечением $20 \times 20 \text{ см}$ из другого.

Таким образом, вполне понятно, что в начальный период опытов в тех образцах, в которых относительное напряжение было больше, деформации ползучести должны были развиваться более интенсивно и получить большее значение. Именно этим и следует объяснить то расположение кривых, которое получилось на фиг. 3 в начальный период опытов.

После длительности нагружения 180 дней наблюдается дальнейшее сближение кривых ползучести и изменение их расположения по отношению друг к другу. В конце опытов хотя деформации разных размеров образцов практически получились одинаковыми, однако в пределах их разницы кривые ползучести расположились так, что чем больше сечение образца, тем меньше ползучесть. Изменение расположения кривых объясняется изменением во времени относительных напряжений благодаря нарастанию прочности бетона во времени.



Фиг. 3.

При рассмотрении данных табл. 1 мы отметили, что как кубиковая прочность, так и прочность бетона на растяжение с увеличением размеров сечения образца уменьшаются. Рассматривая данные годовых испытаний, мы уже наблюдаем обратное явление. В этом случае

Таблица 3

Размеры сечения образцов в см	R в кг/см ²	$\frac{R_{тн}}{R}$	$R_{пр.}$ в кг/см ²	$\frac{R_{пр.}}{R}$	R_p в кг/см ²	$\frac{R_p}{R}$
7 × 7	168	1,16	146	0,87	13,9	0,083
10 × 10	170	1,15	151	0,88	15,2	0,090
15 × 15	197	0,99	173	0,88	17,3	0,083
20 × 20	195	1,0	169	0,86	15,2	0,078

как кубиковая, так и призмная прочность с увеличением размеров сечения образца увеличивается. То же самое имеет место и с прочностью бетона на растяжение. Указанное явление объясняется тем, что в процессе твердения, в обычных условиях, образцы малых сечений благодаря испарению теряли больше воды, чем образцы больших сечений, и поэтому оставшаяся вода была недостаточна для дальнейшего нормального твердения бетона.

Как уже указывалось выше, относительные напряжения в момент нагружения восьмерек сечениями 7 × 7, 10 × 10, 15 × 15 и 20 × 20 см соответственно составляли 0,32; 0,38; 0,48 и 0,43, а к концу опытов — 0,29; 0,26; 0,23 и 0,26. Как показывают последние цифры, нарастание прочности бетона во времени привело к заметному падению относительных напряжений и к их выравниванию. Именно по этой причине

к концу опытов деформации ползучести образцов разных сечений приобретают одинаковые значения.

В начале опытов наибольшее относительное напряжение было в восьмерках сечением 15×15 см (0,48) и наименьшее в восьмерках сечением 7×7 см (0,32). И, несмотря на такую большую разницу относительных напряжений, в итоге их деформации получились одинаковые. Это обстоятельство также приводит к выводу, что при растяжении масштабный фактор не оказывает влияния на ползучесть бетона. В опытах по исследованию влияния масштабного фактора на ползучесть бетона при сжатии разницу деформаций образцов разных сечений мы целиком отнесли к влиянию масштабного фактора, потому что относительные напряжения в начале опытов для всех образцов были одинаковы и во времени изменились незначительно. Так, например, в момент нагружения в призмах сечением 7×7 и 20×20 см относительные напряжения соответственно составляли 0,15 и 0,16, а в конце опытов 0,14 и 0,12. Между тем деформации ползучести указанных образцов, как это видно на фиг. 1, отличаются в 2 раза.

В табл. 4 приведены мгновенные упругие деформации в момент нагружения, предельные деформации ползучести (при $t = 260$ дней), меры ползучести и характеристики ползучести при сжатии и растяжении.

Таблица 4

Размеры сечения образцов в см	Наименование напряженного состояния								$\frac{C_p}{C_c}$
	с ж а т и е				р а с т я ж е н и е				
	$\epsilon_0 \times 10^3$	$\epsilon_n \times 10^3$	$C_c \times 10^6$	η_t	$\epsilon_0 \times 10^3$	$\epsilon_n \times 10^3$	$C_p \times 10^6$	η_t	
7 × 7	14,0	40,5	20,2	2,89	3,2	7,2	18,0	2,25	0,90
10 × 10	13,1	36,0	18,0	2,75	2,8	7,8	19,5	2,79	1,08
15 × 15	13,5	24,0	12,0	1,78	2,5	7,4	18,5	2,96	1,54
20 × 20	13,5	21,0	10,5	1,56	2,6	7,2	18,0	2,77	1,71

Тот факт, что влияние масштабного фактора на ползучесть бетона существенно при сжатии и отсутствует при растяжении, весьма закономерен и исходит из физической природы данного явления. Эти исследования еще раз подтверждают правильность выдвинутой нами в свое время обобщенной гипотезы механизма ползучести бетона (4, 6).

На основании проведенных исследований могут быть сделаны следующие выводы.

1. Масштабный фактор оказывает большое влияние на ползучесть бетона при сжатии. С увеличением размеров сечения бетонного элемента ползучесть уменьшается.

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

3. Характеристика ползучести бетона при сжатии с увеличением размеров сечения бетонного элемента уменьшается.

4. Характеристика ползучести бетона при растяжении с увеличением размеров бетонного элемента увеличивается.

5. Отношение меры ползучести бетона при растяжении к мере ползучести при сжатии с увеличением размеров бетонного элемента увеличивается.

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

7. Расчетные величины ползучести бетона при сжатии для конструкций должны быть установлены в зависимости от размеров их сечений.

Институт математики и механики
Академии наук Армянской ССР

Կ. Ս. ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ

Մասշտաբի գործոնի ազդեցությունը բետոնի սողի վրա սեղման և ձգման և ձգման ժամանակ

Հոդվածը նվիրված է մասշտաբի գործոնի ազդեցությունը բետոնի սողի վրա սեղման և առանցքային ձգման ժամանակ:

Հետազոտությունները ցույց են տվել, որ մասշտաբի գործոնի ազդեցությունը բետոնի սողի վրա սեղման ժամանակ բավականաչափ մեծ է: Բետոնն էլեմենտի կտրվածքի մեծացման հետ սողը մեծանում է: Ինչ վերաբերվում է ձգմանը, ապա այդ դեպքում մասշտաբի գործոնի ազդեցությունը բետոնի սողի վրա բացակայում է: Հաստատված է նաև, որ սողի խարակտերիստիկան էլեմենտի կտրվածքի չափսերի մեծացման հետ, սեղման ժամանակ փոքրանում է, իսկ ձգման ժամանակ մեծանում:

Մասշտաբի գործոնի ազդեցությունը, ինչպես նաև բետոնի հասակի ազդեցությունը երկարատև բեռնավորման մոմենտին, ելնելով նյութի առաձգա-սողքային սևսուբյունից արտահայտված է ֆունկցիոնալ կապով:

Այսպիսով սողի հաշվարկային մեծությունները պետք է ընտրվեն կախված կոնստրուկցիայի ընդլայնական կտրվածքի չափսերից:

ЛИТЕРАТУРА — ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

¹ К. С. Карапетян, „Известия АН АрмССР, сер. физ.-мат., ест. и техн. наук“, 9, № 1 (1956). ² И. И. Улицкий, „Бетон и железобетон“, № 4, 1962. ³ Н. Х. Арутюнян, Некоторые вопросы теории ползучести. Гостехиздат, 1952. ⁴ С. В. Александровский, О методике исследования ползучести и влажностных деформаций бетона. „Методика лабораторных исследований деформаций и прочности бетона, арматуры и железобетонных конструкций“, Труды координационного совещания. Госстройиздат, 1962. ⁵ А. В. Яшин, Ползучесть бетона в раннем возрасте. В сборнике „Исследование свойств бетона и железобетонных конструкций“. Труды НИИЖБ АС и А СССР, вып. 4, Госстройиздат, 1959. ⁶ К. С. Карапетян, „Известия АН АрмССР, серия физ.-мат., ест. и техн. наук“, 6, № 2, 1953.