ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԳԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ

ИЗВЕСТНЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

Մեխանիկա

XX, № 6, 1967

Механика

## С. В. АЛЕКСАНДРОВСКИЙ, В. Я. БАГРИЙ

# ПОЛЗУЧЕСТЬ БЕТОНА ПРИ ЗНАКОПЕРЕМЕННЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Полэучесть бетона экспериментально хорошо изучена при действии сжимзющей нагрузки как постоянной, так и изменяющейся во премени по различным законам. При длительном растяжении поведение бетона изучено значительно слабее, причем исследовались в основном случаи постоянной или ступенчато-изменяющейся нагрузки [4], [5], [6], [8].

Однако, в большинстве конструкций, например, гидротехнических и промышленных, в процессе их эксплуатации нозникают как сжимающие, так и растягивающие напряжения. Интересен также случай периодических воздействий на бетон, поскольку большинство конструкций. находящихся на открытом поздухе или подвергающихся периодическим технологическим циклам (пропарочные камеры, автокланы), работают именно в таких условиях. Примером подобных воздействий могут служить изменения температуры и влажности окружающего воздуха в их годовом или технологических циклах, периодические изменения эксплуатационных нагрузок и т. л.

В снязи с этим авторами в НИИЖБ Госстроя СССР были постанлены специальные опыты по изучению ползучести бетона при действии знакопеременных периодических воздействий. Опыты проводились на двух сериях образцон по примерно одинаковым программе и методике.

Исследовалась ползучесть бетона состава (по весу) —1:2.61:3.62; В/Щ = 0.62 для І-й серии и, соответственно, состава 1:2.54:3.54; В Щ 0.6 для ІІ-й серии. Для приготовления бетопа использовались обычный портландцемент активностью 462 кГслг (1 серия) и 428 кГ слг (II серия), речной посок и мелкий известняковый щебень.

Экспериментальное изучение связи между деформациями бетона и периодически изменяющимися двузначными напряжениями, имеющими период T 14 сут, проводилось в условиях одномерной задачи в области линейной ползучести бетона, т. с. при  $z < 0.45 R_{\rm eff}$  при сжатие п  $z < 0.8 R_{\rm p}$  при растяжении.

Образцы, подвергаемые дейстяню длительной нагрузки, представляли собой бетонные призмы с размерами 7 7 60 см и 10 10× ×100 см со специальными оголовками на стальных плиток. Постоянно действующей растягивающей и периодически изменяющейся нагрузке подвергались образцы с размерами 10 10×100 см, а постоянной сжимающей – 7 × 7 × 60 см и 10×10 100 см.

#### Полаучесть бетона при и акопеременных ноздействиях

Бетонирование образцов производилось в стальных формах в горизонтальном положения. Забетонированные образцы покрывались слоем влажных опилок и находились и таких условиях вплоть до момента распалубки. Сразу же после распалубки в трехсуточном возрасте призмы гидроизолировались парафином, техническим наяелином и несколькими слоями полнатиленовой пленки\*.

Для исключения погрешностей измерений, связанных с влиянием колебаний температуры окружающей среды на показания приборов, служили четыре аналогично гидроизолированных незагруженных образца-близнеца (две призмы сечением 10 × 10 см и двс сечением 7.7 см), которые являлись температурными эталонами. Псказания приборов, установленных из атих аталонах, при обработке данных опытов вычитались на показаний приборов на рабочих образцах, что лозволило выделить чистые деформации призм, вызванные только действием приложенных к ним нагрузок.

Для измерения деформаций образцов по их четырем боконым граням с помощью специальных рамок крепились стационарные индикаторы часового типа. При испытаниях на сжатие база измерения деформаций была равна 500 мм, что обеспечило измерение относительных продольных деформаций призм с большой степенью точности, равной 0.4 · 10<sup>-1</sup>. Для случая испытаний на растяжение и действие знакопеременной периодической нагрузки база измерений равнялась 750 мм, а точность измерения относительных деформаций была при атом еще ныше и составляла 0.3 · 10<sup>-1</sup>.

Опыты проводились в специальной камере при практически стабильных температурно-влажностных услониях с температурой и влажностью воздуха соответственно равными 18 - 1.5 и 60° "- 5°/6.

Возраст приям к началу загружения режимных образцов и первых образцои из числа подвергаемых испытаниям при постоянных напряжениях сжатия и растяжения был равен 4 суткам.

Режимные образцы загружались в соотнетствии с заданными графиками напряжений. При переходе от сжатия к растяжению производилась перестановка этих образцов в установки, специально оснаценные приспособлениями для их растяжения. Загружение образцов длительной постоянной нагрузкой производилось ступенями; между ступенями приращений напряжений делались четырехминутные выдержки. Деформации, натекающие за время выдержек при постоянной нагрузке, относились в последующем к деформациям ползучести.

Кроме основных рабочих призм, для оценки физико-механических свойсти бетона на всем интервале исследования. Из того же самого бетона было изготовлено и испытано большое количество контрольных образцов-близнецов. Призменная прочность бетона в раз-

<sup>•</sup> Испытания вл сидроизблированисть образцал производились с целью исключения погрешностей в определении досторуаций ползучести, связанных с повддигиявостью усадки и ползучести.

личных возрастах определялась испытанием призм с размерами 7 7 60 см и 10 10×100 см. Прочность бетона на осевое растяжение определялась на бетонных восьмерках сечением 10 10 см и 5 5 см с вытянутой призматической частью. Все приямы, посьмерки и кубы хранились гидроизолированными вплоть до их испытания.

Результаты испытаний контрольных образцов-близнецов, приведенные на фиг. 1, позволяют судить о хорошей степени однородности исследуемых бетонов. Призменная прочность бетона была близка к кубиковой и не было выявлено заметного влияния масштабного фактора на прочность кубов и призм.

В онытах было отмечено, что прочность при осевом растяжении восьмерок сечением 5 × 5 см примерно на 20° больше, чем у восьмерок сечением 10 10 см, т. е. в этом случае уже проявилось действие масштабного фактора.

Имеются различные предложения для аналитического выражения закона роста по времени модуля упругости обычного тяжелого бетона. При теоретической обработке результатов описываемых экспериментов было использовано наиболее удачное из них, предложение Н. Х. Арутюняном [3]

$$E(\tau) = E_0 \left(1 - \beta e^{-\tau \tau}\right) \tag{1}$$

На фиг. 1 изображены осредненные кривые роста модуля упругости бетова E(z), которым соотнетствуют следующие значения нараметров, входящих и формулу (1):  $E_{0} = 3.2 \cdot 10 \ \kappa f \ cm^{2}$ ;  $\beta = 0.542$ ;  $\tau = 0.129 \ (cym)^{-1}$  для I серии опытов и, соответствению,  $E_{0} = 3.05 \cdot 10^{5} \ \kappa f \ cm^{2}$ ;  $\beta = 0.575$ ;  $z = 0.09 \ (cym)^{-1}$  для II серии.

На фиг. 2 представлены экспериментальные кривые удельных относительных деформаций ползучести C(t, z) Г серии опытов, являющиеся средними между криными атих деформаций при сжатии  $C_{cs}(t, z)$ и при растяжении  $C_{i-ct}(t, z)$ , которые в этой серии опытов практически мало отличались друг от друга. На фиг. З экспериментальные кривые C(t, z) полученные во II серии опытов, приведены отдельно для случаен сжатия и растяжения, поскольку в этой серии они уже несколько отличались друг от друга. На фиг. 2 и 3 показано также сравнение экспериментальных кривых C(t, z), полученных в опытах, с соответствующими теоретическими кривыми, рассчитанными по аналитическим выражениям:

теории старения [7]

$$C(t_1 - t_1) = C(t_1 - t_1) - C(t_1 - t_1)$$
(2)

и теории упруго-ползучего тела в форме, предложенной С. В. Александровским [1]

$$C(t, \tau) = \phi(\tau) - \phi(t) \left(\frac{1}{e^{\tau t} - A_{\tau}}\right) - \lambda(\tau) e^{-\tau(t-\tau)}$$
(3)

Для I серии опытов (фнг. 2) теоретические кривые  $C(t, z_1)$  по теории старения рассчитычались на основе выражения  $(t - s \operatorname{сутках}, z_1 = 4 \operatorname{cym})$ 



Фиг. 1. Результаты непытаний контрольных образцол близиоцов: а) 1-я серия онытов; б) 11-я серия онытов

$$C(t, \tau_1) = \left[ 51 - 26 e^{-\psi(06(t-\tau_1))} - 25 e^{-1.3(t-\tau_1)} \right] \cdot 10^{-3} \left( \frac{\kappa \Gamma}{c.u^2} \right)^{-1}$$
(4)

причем последующие теоретические криные C(t, -, -1) строились на основе формулы (2), с учетом (4). По теории упруго-ползучего тела кривые C(t, -) в форме (3) рассчитывались с параметрами







Функции же  $\varphi(\tau)$  и  $\Delta(\tau)$  определялись по следующим выражениям:

$$\varphi(\tau) = (33.5 + 36.5 \,\mathrm{e}^{-0.09\tau} - 6.72 \,\mathrm{e}^{-0.1}) \cdot 10^{-1} \left(\frac{\kappa \Gamma}{c_M^2}\right)^{-1}$$

$$\Delta(\tau) = (11.25 - 10.44 \,\mathrm{e}^{-0.125\tau}) \cdot 10^{-1} \left(\frac{\kappa \Gamma}{c_M^2}\right)^{-1}$$
(5)

 $(\tau - u \text{ cytrax}).$ 

Для II серии опытов (фиг. 3) по теории старения теоретические кривые  $C(l, \tau)$  рассчитывались по аналогии с учетом выражений: для случая сжатия

$$C(t, \tau_1) = [78.2 - 28.2 e^{-0.08(t-\tau_1)} - 50 e^{-3(t-\tau_1)}] \cdot 10^{-7} \left(\frac{\pi T}{c\pi}\right)^{-1}$$
(6)

для случая растяжения

$$C(t, \tau_1) = [70 - 34 e^{-0.00(t-\tau_1)} - 36 e^{-0.0(t-\tau_1)}] \cdot 10^{-7} \left(\frac{\pi \Gamma}{c m^2}\right)^{-1}$$
(7)

(t - B CYTKAX, z = 4 cym).

Теоретические же кривые C(t, z) в форме (3) рассчитывались при следующих параметрах и функциях  $\varphi(z), \Delta(z)$ : лля случая сжатия

$$A_{2} = 0.8; \quad \gamma = 0.025 \ (cym)^{-1}; \quad z = 5 \ (cym)^{-1}$$

$$\varphi(z) = (30 + 42.2 \ e^{-(w_{1})^{2}} - 219 \ e^{-w_{1}(39^{2})} \cdot 10^{-7} \left(\frac{\kappa \Gamma}{cm^{2}}\right)^{-1}$$

$$(8)$$

$$\Delta(z) = (7.5 + 22.7 \ e^{-(w_{1}-z)^{2}} - 108.5 \ e^{-(w_{1}-z)^{2}} - 10^{-7} \left(\frac{\kappa \Gamma}{cm^{2}}\right)^{-1}$$



Фиг. 3. Сравнение экспериментальных кривых удельных относительных деформаций ползучеети образцов 11 серин опытов с теоретическими вривыми, рассчитанными по теория упруго-ползучего тела и теория старения.

Аля случая растяжения

$$A_{u} = 0.7; \quad \gamma = 0.03 \ (cym)^{-1}; \quad z = 5 \ (cym)^{-1}$$
$$\gamma (\gamma) = (37 + 87.83 e^{-0.35\gamma}) \cdot 10^{-7} \left(\frac{\kappa \Gamma}{c.\kappa^{2}}\right)^{-1}$$
$$\Delta (\gamma) = (12 + 43 e^{-0.25\gamma}) \cdot 10^{-7} \left(\frac{\kappa \Gamma}{c.\kappa^{2}}\right)^{-1}$$
(9)

 $(\tau - B CYTKAX).$ 

Анализируя данные, принеденные на фиг. 2 и 3, можно сделать вывод, что кривые удельных деформаций ползучести  $C(l, \tau)$ , вычисленные по теории упруго-ползучего тела на основе выражения (3), хорошо согласуются с экспериментальными кривыми на всем дианазоне времени наблюдения t. Из этих же фигур видно, что по теории старения наблюдается значительное занижение деформаций ползучести призм, загруженных в более поздние сроки. Этот недостаток теории старения, как известно, связан с принимаемой ею дополнительной гипотезой о полнов необратимости деформаций ползучести (параллельности кривых  $C(t, \tau)$ ). В дальнейшем это обстоятельство в полной мере проявилось при обработке на основе теории старения результатов наблюдения за цеформациями образцов, подвергаемых длительным двухзначных ступенчатым и пловным периодически изменяюцимся воздействиям.

Соотнетствующие экспериментальные данные о деформациях образцов, полученные при ступенчатых режимах знакопеременных напряжений, приведены на фиг. 4 и 5, соответственно, для І-й и ІІ-й серий опытов.

Следует отметить, что в обсих сериях абсолютный уровень напряжений при растяжении на каждом последующем цикле унеличиналоя согласно принятой методике; при сжатни он также возрастал, но до определенного уроння, равного 100 к/ см- для І-й и т 62 кГ/см<sup>-</sup> для ІІ-й серии опытов.

Приведенные экспериментальные данные характеризуются достаточно хорошим соответствием у образцов-близнецов (расхождение в величинах деформаций образцов-близнецов ве превышало 10%).

Рассматривая фиг. 4 и 5, можно видеть, что изменения деформаций образдов при длительном интервале наблюдения весьма четко соответствуют изменениям напряжений в них. Ввиду того, что опыты начинались в несьма молодом возрасте (начальное загружение образцов производилось в возрасте бетона, равном 4 суткам) с приложения сжимающих напряжений, экспериментальные кривые деформаций на всем интервале исследования в обенх сериях располагаются в области деформаций, соответствующих начальному циклу сжатия. Это, вероятно, объясняется бурным развитием деформаций ползучести в молодом ноэрасте при первичном загружении, а также "старением" бетона и некоторым "отжатием" необратимой части деформаций ползучести.

На графиках фиг. 46 и 56 нанесены соответствующие теоретические кривые, рассчитанные по принципу наложения воздействий, полученные алгебраическим сложением ординат кривых  $\circ(\tau_t) C(t, \tau_t)$ , при соответствующих моментам перехода к напряжениям другого знака. В качестве необходимых для этого кривых мер полаучести брались соответствующие экспериментальные кривые  $C(t, \cdot)$ . На этих же графиках напесены также теоретические кривые, построенные по теории старения.

Из графикон фиг. 46 и 56 видно, что на первом цикле при действии сжимающей нагрузки экспериментальные кривые деформаций ползучести и теоретические кривые, построенные по принципу наложения воздействий, практически совпадают. На этом же цикле при действии растягивающих напряжений теоретические кривые в обеих сериях проходят ниже экспериментальных. Это свидетельствует о некотором "отжатии" части деформаций ползучести после первого же загружения, так как при построении теоретической кривой деформаций использопались экспериментальные данные, относящиеся к "свежезагруженным" образцам.



Фиг. 4. Результаты 1 серии опытов, полученные на режимпых образцах, подвергвутых действию ступенчатых периодние ин измеляющихся коздействий, и сопоставление их с теоретическими данными: а) режим загружения образцов, Б) относительные деформации ползучести режимных образцов, в) полные и упругие относительные деформации режимных образцов. Условище обозначения:

 теоретические кривые по принципу илложения воздействий на основе опытных кривых.

- -----теоретические хривые по теории сторения,
- --- кривая деформаций ползучести,
- - жривая полных деформаций.

Отжатие деформаций ползучести особенно четко проявилось во II-й серии опытов. Из графика фиг. 56 видно, что экспериментальные кривые деформаций ползучести, несмотря на возрастание абсолютных величин напряжений по сравнению с их значением на периом цикле, располагаются ниже криной  $\exists$  (4) C(t, 4), в то время как теоретические кривые, не учитывающие "отжатия" ползучести, проходят выше нее. Это же, но, правда, в меньшей степени проявилось и в І-й серии,



Фиг. 5. Репультаты II серин опытов, полученяме на режимных образцах, подпергнутых действию ступенчатых периодически изменяющихся знакопеременных воздействий, и сопоставление их с теоретическими данными.

- а) Режим загружения образцов.
- б) относительные деформации поляучаети режимпых образцов,
- в) полные и упругие отнасительные деформации режимпых образцов. Примечание: Условные обозначения те же, что и на фиг. 4.

хотя в последующих циклах этой серии имело место значительное увеличение абсолютных величин напряжений и к тому же бетов имел более высокую марку. И в этом случае (см. фиг. 4-б) теоретическая кривая деформаций полаучести существенно превышает кривую

с (4) C (1, 4), в то время как экспериментальная превышает ее незначительно.

На графиках фиг. 46 и 56 также видно, что теоретическая кривая деформаций ползучести при ступенчатых знакопеременных напряжениях, построенная с использованием кривых  $C(t, \tau)$ . вычисленных по теории старения, уже начиная со второй половины первого цикла, качественно и количественно неправильно отражает процесс изменения деформаций ползучести. Эго объясняется тем, что теория старения неправильно постулирует полную необратимость деформаций ползучести.

На графиках фиг. 4в и 5в, представлены экспериментальные и теоретические кривые полных относительных деформаций образцов. Все отмеченные выше особенности поведения бетона, конечно, проявляют себя и в этом случае: однако здесь эти особенности несколько сглаживаются иследствие наличия больших упругих деформаций образцов. Это приводит в целом к достаточно хорошему соответствию между экспериментальными и теоретическими кривыми полных деформаций, полученными на основе экспериментальных кривых C(t, z) по привципу наложения воздействий. Для теоретических же кривых полных леформаций, полученных с использованием кривых мер ползучести, вычисленных по теории старения, попрежнему наблюдается значительно худшее соответствие с экспериментальными кривыми.

Расхождения между величинами ординат экспериментальных кривых полных деформаций режимных образцов и их теоретическими значениями, найденными по принципу наложения воздействий, приведены в табл. 1. В каждой из клеток этой таблицы содержатся три цифры: цифра в числителе означает теоретическую величину полной относительной деформации, увеличенную в 10<sup>3</sup> раз, цифра в знаменателе экспериментальное значение этой деформации, также унеличенное в 10<sup>5</sup> раз, а в скобках указано их отношение.

Полученные в описываемых опытах экспериментальные данные по исследованию связи между папряжениями и деформациями бстона при плавных периодически изменяющихся знакопеременных напряжениях приведены на фиг. 6 и 7.

Изменение напряжений в образцах в Ісерии опытов (фиг. ба) описывается синусондальным законом

$$z(t) = A_t \sin \frac{2\pi}{T} (t - \pi)$$
 (t> $\pi$ ) (10)

Злесь  $A_i$  — различная для каждого полупериода *i* амплитуда цикла, *T* — период цикла, в опытах равный 14 суткам, а  $\pi$  — моменты времени, соответствующие началу каждого из последовательных полупериодов.

В конце опыта, в возрасте бетона, раяном 60 суткам, два режимных образца этой серии были загружены ступенчато-сжимающей

нагрузкой до уроння напряжений з = 100 к/ см<sup>2</sup> = 0.36 R<sub>пр</sub>, а один образец находился в разгруженном состоянии.

Таблица 1

Возраст бетона в сут- ках к моменту на- блюдения	llo таорын упруго-ползучего тела		По теория старевня	
	І сория	II серия	1 серия	ll серия
7.5	28 27.6 (1.01)	<u>37 2</u> <u>36.4</u> (1.02)	29.5 27.6 (1.07)	37.2 36.4 (1.02)
14.5	4.0 5.0 (0.8)	10 (0.8)	$\frac{12.1}{5.0}$ (2.48)	20. 63)
21.5	$\frac{48.4}{48}$ (1.01)	47 (1.04)	45.6 (0.95)	44 (0.97)
28.5	7.3 (0,90)	$\frac{13.4}{13.4}$ (1.00)	15.2 (1.67)	$\frac{21.2}{13.4}$ (1.53)
ē.ē£	57.4 (1-01) 57.0	<u>53</u> (1 09) 48.6	52.8 (0.93) 57	43 (0.99)
42.5	$\frac{11.2}{12.2}$ (0.92)	$\frac{17.2}{15.4}$ (1.12)	$\frac{16.6}{12.2}$ (1.36)	$-\frac{22.0}{15.4}$ (1.40)
49.5	$-\frac{62}{59.6}$ (1.04)		<u>54.</u> <u>59.6</u> (0.91)	-
56.5	12 (0.92)	—	$\frac{16.8}{12.1}$ (1.28)	_
90	-70 (L.07) -65.8 (L.07)	_		-
Абсолютная неличина максимяльного от- клоцения в <sup>а</sup> о	20	20	148	63.2
Среднее квадратич- пос отклонение в <sup>п</sup> о	10.72	10.3	56.72	39.21

Сопоставление экспериментальных и теорегических значения полных диформаций бетона, вычисленных по принципу наложения воздействия

По ряду соображений, о которых будет сказано ниже, во II серии опытов изменение напряжений в образцах (фиг. 7а) в течение полупериода первого цикла сжатия производилось по закону, который описывался суммой днух простых экспонент, причем:

при

$$4 \le t \le 7.5 \quad z(t) = 40.92 |1 - e^{-1.5(t-1)}| \frac{\kappa I}{c M^2}$$
(11)  

$$\frac{365 \le t \le 11 \quad \sigma(t) = 40.92 [1 - e^{-1.5(11-t)}] \frac{\kappa I}{c M^2}$$

(t - a cytrax).

В последующем же напряжения в образцах изменялись по синусондальному закону в соответствии с выражением (10). Таким образом, в этой серии на первом полупериоде наблюдалось розкое повышение относительного уровия напряжений, в последующем же эти изменения имели уже более спокойный периодический характер.



Фиг. 6. Результаты 1 сорин опытов, полученные на режимных образцах, подвергяутых действию планных периодически меняющихся энакопеременных изприжений, и сопоставление их с теоретическими данными: а, б)—режимы загружения образцов, и) отпосительные деформации ползучести режимых образцов, г)—полные и упругие ог-

посительные деформации режимных образцов.

Условные обозпачения:

Экспериментальная кривая относительных деформация ползучести, теоретические кривые по теории упруго-полаучего тели. теоретические кривые по теории старения, теоретические кривые по теории старения,

В каждой серии опытоп рожниным испытаниям подвергались три образца-близнеца, относителные деформации ползучести которых изображены на графиках фиг. 6в и 7н сплошной линией. Величины этих деформаций получались вычитанием из текущих экспериментальных 1 Известия АН АрмССР, Мехалика. № 6 значений полных деформаций образцов их упругих деформаций, подсчитанных по формуле

$$\tilde{s}_{\text{pres}}(t) = \frac{\sigma(t)}{E(t)} \int \sigma(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \left[ \frac{1}{E(\tau)} \right] d\tau$$
(12)

где  $\tau(t)$  и E(t) — соответственно напряжения и образце и модуль упругости бетона в момент наблюдения t, а  $\tau(\tau)$  и  $E(\tau)$  — их текущие значения на исследуемом интервале опыта.



Фит. 7. Результаты II серин опытов, полученные на режимных образцах, подвергнутых действию плавных периодически мениющихся энаконеременных напряжений, и сопоставление их с теоретическими данными: а, б) – режимы загружения образцов, и) – относительные деформации ползучести режимных образцов, г) – полные и упругие относитольные деформации режимных образцов.

Примечание: Услоявые обозначения те же, что и на фиг. 6.

Уравнение (12) после интегрирования по частям и с учетом того, что в начале нерлюдения, т. е. при  $I = - z(\tau_1) = 0$ , принимает вид

$$\overline{\varepsilon}_{ynp}(t) = \int \sigma'(z) \frac{1}{E(z)} dz$$
(13)

Входящие в это выражение величины z'(z) для соответствующих участков интегрирования вычислялись на основе формул (10) и (11), а модуль упругости E(z) — по формуле (1) при соответствующих значениях входящих в нее параметров.

На графиках фиг. бг и 7г представлены экспериментальные кривые полных деформаций режимных образцов. Наблюдается хорошее согласование опытных данных, найденных по 3 образцам. что свидстельствует о достоверности полученных результатов. На этих же графиках нанссены кривые упругих деформаций  $\frac{z(t)}{E(t)}$ , которые по своему характеру соответствуют изменениям напряжений в образцах на исем интервале наблюдения.

Кривые полных деформаций в общем также хорошо соответствуют закону изменения напряжений в образцах. Однако, наблюдается некоторое смещение по фазе кривых полных относительных деформаций относительно кривых изменений папряжений, т. с. экстремальные техьи стих григых не сопгадают по времени. Это объясняется тем. что деформации ползучести бетона, которые входят в полные деформации, обладают свойством "наследственности", т. е. история загружения и длительность его действия оказывают влияние на деформацию ползучести в давный мемент времени наблюдения.

Сказанксе сообсною ясно видно на графиках фиг. бв и 7в, где экспериментальные точки кривых деформаций ползучести смещены относительно акстремумов кривых напряжений сще в большей степени, чем на графиках полных деформаций.

Следует отметить, что в обенх сериях опытов кривые деформаций ползучести и полкых деформаций находятся целиком в области их положительных значений, соотнетствующих начальному циклу сжатия, хотя к образцам прикладывались энакопеременные изпряжения. Это объясняется тем, что первый цикл начинался с приложения сжимающей нагрузки в бетоне очень молодого возраста, а также наличием "старения" бетона и "отжатия" некоторой необратимой части деформаций ползучести, которое проявилось в заметном смещении вкспериментальных кривых деформаций ползучести вдоль оси ординат.

На графике фиг. бв, кроме экспериментальной кривой ползучести, воказаны также соответствующие теоретические кривые, рассчитанные на основе теории упруго-ползучего тела и теории старения.

Вычисление ординат кривой деформаций ползучести по теории упруго-ползучего тела производилось с использованием выражения (3) методом численного интегрирования по участкам на основе выражения

$$\overline{\varepsilon}_{\text{noll}}(t) = -\int_{0}^{t} z(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} C(t, \tau) d\tau \qquad (14)$$

Входящие сюда напряжения  $\mathfrak{I}(\mathfrak{I})$  определялись по формуле (10) при соответствующих значениях нараметрон для данного участка интегриронания, функции же  $\mathfrak{I}(\mathfrak{I})$ ,  $\Delta(\mathfrak{I})$  и параметры  $A_2$ ,  $\mathfrak{I}$ ,  $\alpha$  имели значения, указанные выше.

Аналогичным образом на основе выражения (14) нычислялись ординаты кривых деформаций ползучести и по теории старения, но с учетом формул (2) и (4).

Из графика фиг. бв видно, что теоретическая кривая деформаций полаучести, полученная на основе теории упруго-полаучего тела, качественно правильно отражает процесс деформирования и хорошо согласуется с графиком изменения напряжений в режимных образцах. Для этой кривой отмечается небольшой сдниг но фазе по сравнению с кривой изменения напряжений. Однако этот слвиг уже меньше, чем у кривой экспериментальных деформаций полаучести.

Сравнивая экспериментальную кривую деформаций ползучести с кривой, полученной на основе теории упруго-ползучего тела с использованием выражения (3), видим, что вторая кривая на полупериодах, когда действовали сжимающие напряжения, проходит выше первой, причем достигнутое на первом полупериоде расхождение в ординатах сравниваемых кривых фактически сохраняется и в дальнейшем, лишь несколько увеличиваясь к концу периодических изменений напряжений.

Следует отметить, что при построении теоретических кривых деформации ползучести и расчет вводились зналитические пыражения С(t, =), полученные обработкой семейства колвых мер ползучести, средних между экспериментальными кривыми, полученными при действии постоянных сжамающих и постоянных растягивающих напряжений. Влиду того, что при действии напряжений з = 0.4 Rap уже может проявляться некоторая нелинейность деформаций ползучести [2], можно думать, что начальное расхождение между теоретической и экспериментальной криными деформаций ползучести на перзом полуперзоде объясняется эменно этим обстоятельством. Кроме того, следует учесть, что ординаты введенных в расчет краных  $C_{-1}$  (t. т) несколько больше ординат кривых  $C_{part}$  (t. т), так как в данной серин опытов имело место условие Соле. (1, 1) С. (1, 5). Увеличение же расхождения между теоретической и экспериментальной кривыми деформаций ползучести в процессе опыта, нероятно, связано с отжатнем некоторой необратимой части деформаций ползучести, что изиболее четко видно на последнем этане опыта, т. с. при t > 60 суток.

Из графика фиг. би видно, что теоретическая кривая деформаций ползучести, рассчитанная на основе теории старения, на первом полупериоде располагается ниже экспериментальной кривой, а и последующем, иссмотря на периодические изменения напряжений, практически не изменяется, что снязано с принятой в этой теории гипотезой о полной необратимости деформаций ползучести бетона.

Ввиду того, что в l серии опытов па перном полуперноде при лействии сжимающих напряжений наблюдалось ощутимое расхождение между кривой деформаций ползучести, найденной на основе теории упруго-ползучего тела и экспериментальной кривой, во ll серии опытов на первом полуперноде напряжения прикладывались не по синусоидальному закону, а по экспоненциальному, более близкому к ступенчатому нагружению.

Предполагалось, что если указанное расхождение связано с нелинейностью деформаций полаучести, го при переходе к такому режиму загружения образцов оно будет меньшим вообще и особенно на начальном полуцикле.

Действительно, ато и наблюдалось во II серии опытов (фиг. 7). Как следует им графика фиг. 7в. расхождение между теоретической и экспериментальной кривыми поляучести режимных образцов было уже значительно меньшим, чем в I серии. Все же остальные особенности кривой деформаций поляучести, рассчитанной на основе теории упруго-поляучего тела и выражения (3), аналогичны описанным выше для I серии опытов.

В табл. 2 принедено сравнение теоретических (цифры в числителе), вычисленных по теории упруго-ползучего тела с использованием выражения (3), и экспериментальных (цифры в знаменателе) значений полных относительных деформаций бетона, в также указано (в скобках) их отношение.

Из графика 7в видно, что кривая деформаций ползучести, найденная на основе теории старения, и в этой серии опытов на всем интервале наблюдения неправильно отражает процесс изменения деформаций ползучести, особснио на периом полупериоде, когда действонали бурно возрастающие сжимающие напряжения, что согласуется с данными, приведенными в работе [2].

На основе всего изложенного выше можно сделать вывод, что при ступенчатых и планных периодически изменяющихся знакопеременных папряжениях процесс деформирования бетона практически вполне хорошо качественно и количественно описывается на основе теории упруго-ползучего тела с использованием для меры ползучести выражения (3).

В этом случае теоретические кривые деформаций бетона достаточно удовлетворительно согласуются с соответствующими экспериментальными данными. При этом, как следует из табл. 2, наибольшее из наблюдаемых в опытах расхождение между теоретическими и экспериментальными кризыми полных деформаций режимных образцов не превышало 18%, а средне-квадратичное отклонение -- 11%.

		Таблица 2
Возраст бетона в сутках к моженту наблюдения	І серия	11 серия
7.5	$\frac{31.2}{26.4}$ (1.18)	41.4 37.3 (1.09)
14.5	2. (1.0)	$\frac{11.6}{12.6}$ (0.92)
21.5	49 (1.10)	45.2-(1.03)
28.5	4.0 (1.0)	12.6 13.8 (0.91)
35.5	<u>53.6</u> (1.12)	43.6 (1.03)
42.5	4.8 (0.92)	12.6 (0.93)
49.5	48 (1.13)	-
56.5	4.4 (0.92)	-
90	<u>63.6</u> (1.17)	- Andrew
Максимальщое отилопение в о	18	9.5
Средне-киадратичное отклоне- ние в ° о	11.3	7.1

Примечацие: Абсолютные зночения деформаций, приведенные в таблице, увеличены в 103 риз-

.еория же старения качественно и количественно исправильно отражает процесс деформирования бетона при периодически изменяющихся знакопеременных напряжениях.

Научно-исследователь жий институт бетопа и железобетоне Госстроя СССР

Поступила 101V 1967

#### Ս. Վ. ԱԼԵՐՍԱՆԴՐՈՎՍԿԻ, Վ. Յ. ԲԱԳՐԻ

## ՔԵՏՈՆԻ ՍՈՂՔԸ ՆՇԱՆԱՓՈ<mark>Խ, ՊԱՐԲԵՐԱԿԱՆ ՆԵՐԳՈՐԾՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ</mark> ԺԱՄԱՆԱԿ

Ամփոփում

Բետոնե են արտարի հատնի կոնստրուկցիաները շահաղորձման պրոցեսում համար են խարկիում են նշանափոր, պարրերական ներգորությունների, որինակ՝ բեռների կամ օգի չերուստրենունի ու խոնավություն պարրերական փոփոխությունների հետևանորդի Բետունի դեֆորմացիաների փորձնական ուսուքետսիրախյունը՝ միաչափ ինգրի պարձանների առկայուխյուն գեպթում և դժալին սուգջի սաչմաններ բամ, պարբերարար փոփոխվող երկնչան լարուքների երկարատև ազդեցուխյան գեպթում, երբ պարբերությունը Տավասար է 14 օրվա, ի չալա է բերել մի շարը Տետաւթրրիր օրինաչափություններ։

Բեռնավորման առաջին ցիկյում կատարվում է ռողջի դեֆորմացիաների մի մասի շարտասեղմում», որը հետադայում դառնում է անհակադարձելի։ Այս պատճառով՝ սեղման սկղբնական ցիկյից հետու նմուշների դեֆորմացիաների կորերը փորձի ամրողջ ընխացրում շարունակում են մնալ սեղման գեֆորմացիաների տիրուլխում, չնալած նմաշների վրա հետադալում կիրասվում են նշանափոխ լարումներ։

Առդջի դեֆորմացիաները օժաված են «ժառանդականություն» հատկությամը, որի դեպջում բեռնավորման պատմությունը և ներդործության երկարատետ խյունը աղդում են դեֆորմացիայի վրա դիաման ավյալ ակնթարթում, Այդ պատճառով պարթերաբար փոփոխվող բեռներով ներդործվող նմաշների լրիվ դեֆորմացիաների կորերը ունեն որոշակի շեղամ՝ ըստ փոլի, լարունների փոփոխությունների կորերի նկատմամբ։

### S. V. ALEKSANDROVSKY, V. Y. BAGRY

# THE CREEP OF CONCRETE ON ALTERNATING PERIODICAL INFLUENCES

# Summary

Reinforced concrete constructions are often subjected, when in service, to alternating periodic influences, for example due to periodic changes in load or temperature and humidity of air. Therefore, it is important to study concrete behaviour under such conditions.

Experimental investigations of concrete strains under the long time effect of periodically changing two-digit stresses with the period equal to 14 days under the conditions of one-dimensional task and in the field of linear creep are given in this paper. These investigations have shown some interesting regularities.

There is some "compression" of the part of creep strain in the first stage of loading, which is non-reversible afterwards.

In connection with this the curves of specimen strains during all the time of the experiment after the initial cycle of compression continued to be in the field of compression strains, although the specimens were subjected later on to applied alternating stresses.

The creep strains have the properties of "heredity" under which the history of loading and duration of its action influenced the strain at this moment of observation.

Owing to this, the curves of total strains of specimens subjected to periodically changing stresses have some displacement on the phase concerning the curves of stresses alteration. Under stepped and smooth, periodically changing stresses, the process of concrete deformation is practically quite well described on the basis of the theory of "elastic-creep body" with utilization of the principle of superposition and specified analytic expression for measure of concrete creep proposed by S. V. Alaxandrovsky

$$C(t, \tau) = \tilde{\tau}(\tau) - \tilde{\tau}(t) \left(\frac{e^{\tau} - A_{\tau}}{e^{\tau} - A_{\tau}}\right) - \Lambda(t) e^{-d(\tau-\tau)}$$

in which

a,  $\gamma$ ,  $A_{\alpha}$  parameters selected from the experiment where  $\gamma(t)$  and  $\gamma(t)$  monotonously deminishing functions, fixed upon the experiment results similar to the function of ageing applying in this theory, where

 $\varphi(t) - \varphi(t) = \varphi(t)$ 

In this case the theoretical curves of concrete strains in conformity with the experimental data are well enough.

A mean-square deviation of the theoretical curves of strains from the experimental data in the described tests does not exceed 11.

The process of concrete deformation under the periodically alternating effects is incorrectly described by the theory of ageing quantitatively and qualitatively and for this reason this theory should not be applied.

#### **АНТЕРАТУРА**

- Алексиндровский С. В. Разчет бетонных и железобетонных понструкций на температурцые и влажностные воздействия (с учетом ползучести). Стройнздат, 1966.
- 2 Алитески селона С. В., Баграй Э. Я., Попкова О. М. Некоторые экспериминтальян-теоретические копросм феноменологической теории ползучести бетони, важные для се дальяевшего развития. VI конференция по бетону и желелобетону. Материалы секций конференции, подготовленные НИИЖБ Госстроя СССР, вып. I. Стройнадат, 1966.
- 3. Арутнонян Н. Х. Некоторые попросы теории полуучести бетопа. Гостехтеориздат, 1952.
- 4. Блинков В. Исследование получеств бетова пры повторных длятельно дейченующих нагрузках. Известия ВНИИГ, т. 60, 1958
- Висильев П. И. Некоторые вопросы плистических деформаций бетопа. Известия ВНИИГ. т. 49, 1953.
- Котан Н. И. Исследование ползучаети бетона при высаних напряжениих. Исследование свою го чточка и челезобазонных конструкций. Труды НИНЖБ, вып. 4. Стройнудат, 1959.
- Улициий И. И. Чтин Чтун-Яо, Гольшев А. Б. Расчет теледобетонных конструкций с учеток длительных процессов. Стройнадат УССР, 1960.
- Histon I. M. The Creep of Concrete under Uniaxial Tension. Magazine of Concrete Research, vol. 17, No. 51, 1965.