

С. В. АЛЕКСАНДРОВСКИЙ, Н. А. КОЛЕСНИКОВ

ПОЛЗУЧЕСТЬ БЕТОНА СТАРОГО ВОЗРАСТА ПРИ СТУПЕНЧАТО-ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ НАПРЯЖЕНИЯХ СЖАТИЯ, ДОСТИГАЮЩИХ ВЫСОКОГО УРОВНЯ

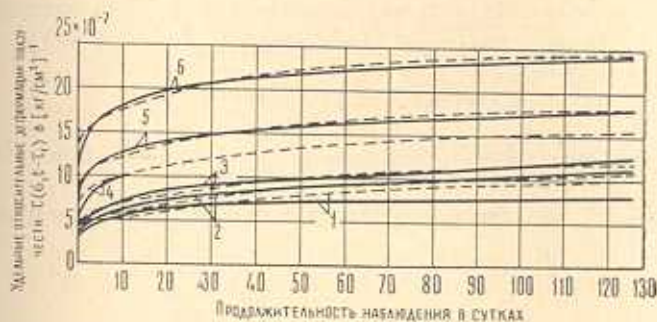
Исследования, посвященные изучению деформаций бетона при переменных напряжениях сжатия высокого уровня немногочисленны. Экспериментальные же данные о ползучести бетона при таких нагрузках, особенно носящих периодический характер, имеют большое значение для нелинейной теории ползучести, так как позволяют судить о степени точности ее исходных уравнений. В связи с этим в НИИЖБ Госстроя СССР было проведено несколько серий длительных экспериментов, в частности, на бетоне, физико-механические свойства которого практически не изменялись на протяжении опыта. Ниже кратко описываются результаты именно этих последних экспериментов.

Исследования проведены на изолированных от высыхания призмах размером $7 \times 7 \times 60$ см из бетона состава (по весу) 1:2.26:3.77, $V/D = 0.55$. Средняя прочность на сжатие кубов с ребром 20 см в месячном возрасте была равна 278 кг/см^2 . Призменная прочность бетона к моменту начального нагружения образцов составляла $R_{пр} = 362 \text{ кг/см}^2$, а модуль упругости $E = 3.65 \cdot 10^5 \text{ кг/см}^2$. Образцы были подвергнуты одноосному сжатию в рычажных установках. Для отделения упругих деформаций от деформаций ползучести нагружение призм осуществлялось ступенями напряжений с 4-минутными выдержками между ними. Деформации, измеренные за время этих выдержек, причислялись к деформациям ползучести. Возраст бетона к началу нагружения образцов был равен 9 месяцам.

Широкий диапазон изменения напряжений в опытах, максимум которых достигал почти предела длительной прочности бетона, позволил выяснить закономерности в развитии деформаций ползучести и изучить погрешности основных разновидностей нелинейной теории ползучести.

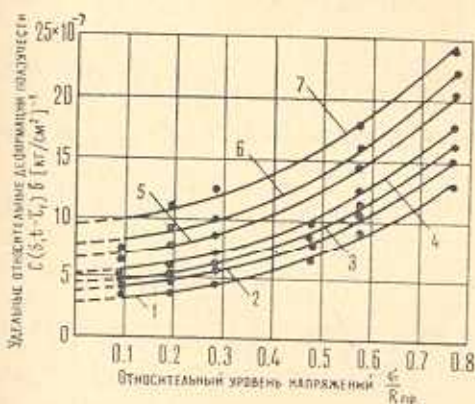
С целью получения данных, необходимых для последующей теоретической обработки экспериментальных данных о деформациях бетона при переменных напряжениях, часть образцов исследовалась также при разных уровнях постоянных напряжений сжатия, равных (с округлением) 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.6, и $0.8 R_{пр}$. Экспериментальные кривые удельных деформаций ползучести $C(\tau, t - \tau)$ образцов, нагруженных таким способом, приведены на фиг. 1. Как видно из этой фигуры деформации ползучести нелинейно зависят от напряжений, начиная с самых низких их уровней, поскольку ординаты кривых $C(\tau, t - \tau)$ различаются по величине во всем диапазоне действующих напряжений.

Об этом же свидетельствует фиг. 2, на которой представлена зависимость удельных деформаций ползучести $C(\sigma, t - \tau_1)$, натекающих за равные промежутки времени, от относительного уровня напряжений в образцах. Следовательно, в этом случае также, как и в опытах (2) и (6), отсутствовала область линейной ползучести.



Фиг. 1. Экспериментальные кривые удельных деформаций ползучести бетона (сплошные линии), нагруженного в возрасте $\tau_1 = 272$ сут., и теоретические кривые (пунктирные линии), рассчитанные на основе (1) с учетом (5) — (8).

- 1 - $\sigma = 0.09 R_{np}$, 2 - $\sigma = 0.19 R_{np}$, 3 - $\sigma = 0.29 R_{np}$,
4 - $\sigma = 0.48 R_{np}$, 5 - $\sigma = 0.58 R_{np}$, 6 - $\sigma = 0.77 R_{np}$.



Фиг. 2. Кривые зависимости удельных деформаций ползучести бетона, нагруженного в возрасте $\tau_1 = 272$ сут., от уровня напряжений $\frac{\sigma}{R_{np}}$.

- 1 - $t - \tau_1 = 1$, 2 - $t - \tau_1 = 3$, 3 - $t - \tau_1 = 5$, 4 - $t - \tau_1 = 10$,
5 - $t - \tau_1 = 28$, 6 - $t - \tau_1 = 56$, 7 - $t - \tau_1 = 126$ (t и τ_1 в сутках).

Для аппроксимации кривых $C(\sigma, t - \tau_1)$ была принята зависимость, аналогичная (2):

$$C(\sigma, t - \tau_1) = C_{\min}(t - \tau_1) + C_{II}(\sigma, t - \tau_1) \quad (1)$$

где $C_{\min}(t - \tau_1)$ — мера линейных деформаций ползучести, определяемая, как это было предложено Р. А. Мельником (6), экстраполяцией до оси ординат кривых, изображенных на фиг. 2, а $C_{II}(\sigma, t - \tau_1)$ — не-

линейная составляющая удельных деформаций ползучести, определяемая как разность ординат кривых $C(\tau, t - \tau)$ и $C_{\min}(t - \tau)$. При этом

$$C_H(\tau, t - \tau) = \frac{f[\sigma(\tau)]}{\sigma(\tau)} C_H(t - \tau) \quad (2)$$

здесь $f[\sigma(\tau)]$ — нелинейная функция напряжений $\sigma(\tau)$, которую для исследованного бетона оказалось возможным принять в виде

$$f[\sigma(\tau)] = \sigma(\tau) \bar{\sigma}^2(\tau) \quad (3)$$

где $\bar{\sigma}(\tau)$ — относительные напряжения $\bar{\sigma}(\tau) = \frac{\sigma(\tau)}{\sigma_0}$, при принятом далее $\sigma_0 = 1 \text{ кг/см}^2$, численно равные фактически действующим напряжениям $\sigma(\tau)$, а

$$C_H(t - \tau) = \frac{C_H(\tau, t - \tau)}{\bar{\sigma}^2(\tau)}$$

— инвариантная относительно начала загрузки „мера“ нелинейных деформаций ползучести.

Для бетонной призмы, нагруженной в момент времени $\tau = \tau_1$ постоянными осевыми напряжениями $\sigma(\tau_1) = \text{const}$, с учетом (1) и (2) для относительной деформации ползучести $\varepsilon(t)$ к моменту времени t будем иметь:

$$\varepsilon(t) = \sigma(\tau_1) C_{\min}(t - \tau_1) + f[\sigma(\tau_1)] C_H(t - \tau_1) \quad (4)$$

Аналитические выражения для $C_{\min}(t - \tau)$ и $C_H(t - \tau)$ принимались в форме (1):

$$C_{\min}(t - \tau) = \psi_0 [1 - e^{-\gamma_0(t-\tau)}] + \Delta_0 [1 - e^{-\alpha_0(t-\tau)}] \quad (5)$$

$$C_H(t - \tau) = \psi_H [1 - e^{-\gamma_H(t-\tau)}] + \Delta_H [1 - e^{-\alpha_H(t-\tau)}] \quad (6)$$

при следующих значениях параметров, определенных из опыта:

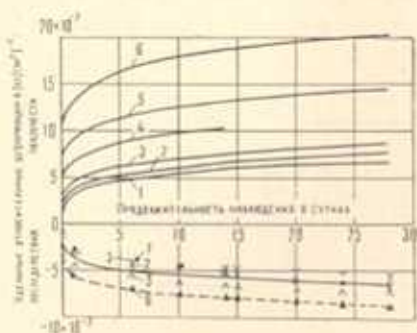
$$\begin{aligned} \psi_0 &= 6.7 \cdot 10^{-7} (\text{кг/см}^2)^{-1}; & \Delta_0 &= 3.8 \cdot 10^{-7} (\text{кг/см}^2)^{-1} \\ \alpha_0 &= 3.0 (\text{сут.})^{-1}; & \gamma_0 &= 0.018 (\text{сут.})^{-1} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \psi_H &= 5.22 \cdot 10^{-12} (\text{кг/см}^2)^{-1}; & \Delta_H &= 14.2 \cdot 10^{-12} (\text{кг/см}^2)^{-1} \\ \alpha_H &= 5.0 (\text{сут.})^{-1}; & \gamma_H &= 0.06 (\text{сут.})^{-1} \end{aligned} \quad (8)$$

Теоретические кривые $C(\tau, t - \tau)$, рассчитанные на основе (1) с учетом (2) — (6), а также (7) и (8), показаны на фиг. 1 пунктирными линиями.

Исследование ползучести при постоянных напряжениях дало возможность получить дополнительные сведения о степени нелинейности деформаций упругого последствия, развивающихся в бетоне после

снятия нагрузки. На фиг. 3 приведено сопоставление удельных деформаций последействия (мер последействия) образцов, разгруженных через $t - \tau_1 = 56 \text{ сут.}$, с соответствующими удельными деформациями ползучести впервые загруженных образцов-близнецов.



Фиг. 3. Сопоставление удельных деформаций ползучести бетонных образцов, загруженных в возрасте $\tau_1 = 272 \text{ сут.}$, с удельными деформациями последействия образцов-близнецов, разгруженных в возрасте $\tau_2 = 328 \text{ сут.}$

1 - $\sigma = 0.09 R_{пр}$, 2 - $\sigma = 0.19 R_{пр}$, 3 - $\sigma = 0.29 R_{пр}$,

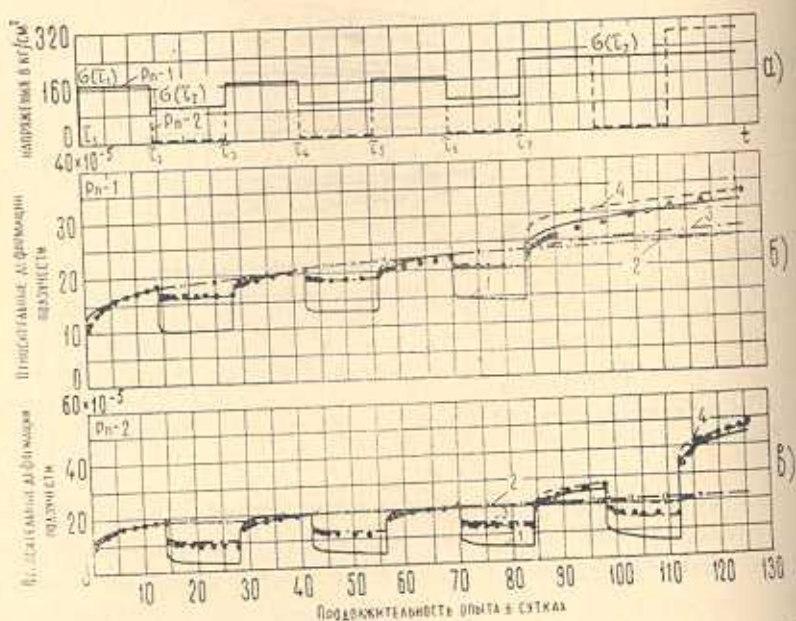
4 - $\sigma = 0.48 R_{пр}$, 5 - $\sigma = 0.58 R_{пр}$, 6 - $\sigma = 0.77 R_{пр}$.

(Момент τ_1 загрузки образцов условно совмещен с моментом τ_2 разгрузки образцов-близнецов).

Согласно принципу наложения воздействий, деформации ползучести и последействия за одинаковые промежутки времени должны быть равными или близкими по величине. Если же обратиться к фиг. 3, то можно заметить, что деформации последействия образцов, разгруженных с разных уровней напряжений, незначительно различаются между собой и близки по величине к деформациям $C_{min}(t - \tau)$ (фиг. 2). Следовательно, обратимость деформаций ползучести, по-видимому, связана только с обратимостью их линейной составляющей. Исключение составляет лишь случай разгрузки образцов с уровня напряжений, близких к пределу длительной прочности бетона ($\sigma = 0.77 R_{пр}$). Здесь наблюдается некоторое отклонение от указанной закономерности. Анализ возможных причин этого показал следующее.

Модуль упругости бетона при разгрузке образцов с уровня $\sigma = 0.77 R_{пр}$ оказался в среднем на 4% меньше своего значения в момент загрузки. Поэтому величина упругих деформаций, обратившихся после разгрузки, была несколько больше, чем при загрузке образцов. Уменьшение модуля упругости вызвано, очевидно, некоторым разуплотнением начальной структуры бетона от длительного действия нагрузки высокого уровня. Возможно, что наблюдающаяся в этом случае большая величина удельных деформаций последействия связана именно с этим, а не является свидетельством частичной обратимости нелинейной составляющей деформаций ползучести.

На фиг. 4 и 5 представлены экспериментальные кривые деформаций образцов при периодических ступенчато-изменяющихся напряжениях, достигающих высокого уровня, и соответствующие теоретические кривые. Сопоставление экспериментальных величин деформаций с их теоретическими значениями производилось на основе следующих вариантов нелинейной теории ползучести бетона.



Фиг. 4. Режимы загрузки образцов (а) и деформации ползучести (б) и (в) при периодических ступенчато-изменяющихся напряжениях. 1—теоретические кривые деформаций, рассчитанные на основе выражения (9). 2—то же—на основе (10); 3—то же—на основе (13); 4—то же—на основе выражений, аналогичных (14) (экспериментальные значения деформаций обозначены точками).

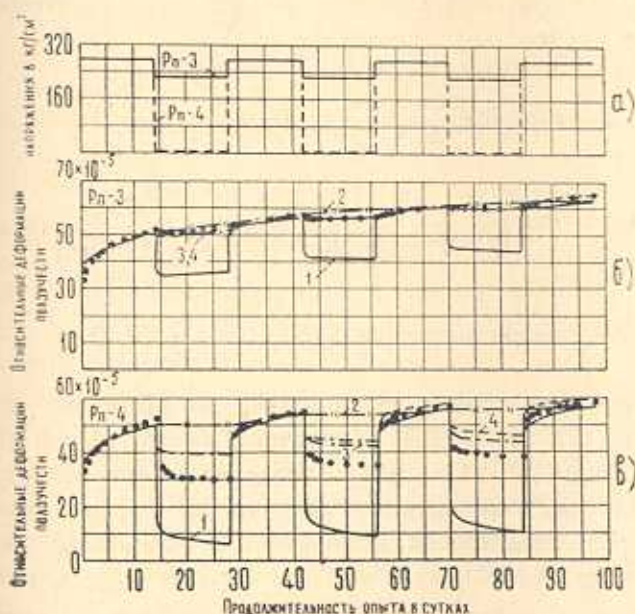
1. Обе составляющие деформаций ползучести $C_{\min}(t-\tau)$ и $C_{\text{н}}(t-\tau)$ записываются на основе теории упругой наследственности. Выражение для полных деформаций образца при действии переменных во времени напряжений $\sigma(\tau)$ в этом случае имеет вид:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E} - \int_{\tau_0}^t \sigma(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} C_{\min}(t-\tau) d\tau - \int_{\tau_0}^t f[\sigma(\tau)] \frac{\partial}{\partial \tau} C_{\text{н}}(t-\tau) d\tau$$

где первый член правой части уравнения представляет собой упругую деформацию бетона в момент времени t , второй член—линейную, третий—нелинейную части деформаций ползучести, а $f[\sigma(\tau)] = \sigma(\tau) \bar{\sigma}(\tau)$. Таким образом, здесь и в дальнейшем, в отличие от (3), принимается

что связь между деформациями ползучести и напряжениями нелинейна во всем диапазоне действующих напряжений, начиная с самых низких их уровней.

Теоретические кривые деформаций ползучести, рассчитанные на основе (9) с учетом (5) и (6) и параметров (7) и (8), обозначены на фиг. 4 и 5 цифрой 1.



Фиг. 5. Режимы загрузки образцов (а) и деформации ползучести (б) и (в) при периодических ступенчато-изменяющихся напряжениях. Условные обозначения те же, что и на фиг. 4.

II. Обе функции $C_{\min}(t-\tau)$ и $C_H(t-\tau)$ записываются на основе теории старения. В этом случае полные деформации равны:

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E} - \int_{\tau_1}^t \sigma(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} [C_{\min}(t-\tau_1) - C_{\min}(\tau-\tau_1)] d\tau - \\ - \int_{\tau_1}^t f[\sigma(\tau)] \frac{\partial}{\partial \tau} [C_H(t-\tau_1) - C_H(\tau-\tau_1)] d\tau \end{aligned} \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} C_{\min}(t-\tau_1) - C_{\min}(\tau-\tau_1) = \psi_0 [e^{-\gamma_0(t-\tau_1)} - e^{-\gamma_0(\tau-\tau_1)}] + \\ + \Delta_0 [e^{-\alpha_0(\tau-\tau_1)} - e^{-\alpha_0(t-\tau_1)}] \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} C_H(t-\tau_1) - C_H(\tau-\tau_1) = \psi_H [e^{-\gamma_H(\tau-\tau_1)} - e^{-\gamma_H(t-\tau_1)}] + \\ + \Delta_H [e^{-\alpha_H(\tau-\tau_1)} - e^{-\alpha_H(t-\tau_1)}] \end{aligned} \quad (12)$$

Теоретические кривые деформаций ползучести, рассчитанные на основе (10) с учетом (11) и (12) и параметров (7) и (8), обозначены на фиг. 4 и 5 цифрой 2.

III. Функция $C_{\min}(t - \tau)$ записывается на основе теории упругой наследственности, а функция $C_H(t - \tau)$ — на основе теории старения. Подобное предложение ранее было сделано в работе [4]. При этом подразумевается, что линейная составляющая деформаций ползучести полностью обратима, а нелинейная — полностью необратима при разгрузках. В этом случае

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) = & \frac{\sigma(t)}{E} - \int_{\tau_1}^t \sigma(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} C_{\min}(t - \tau) d\tau - \\ & - \int_{\tau_1}^t f[\sigma(\tau)] \frac{\partial}{\partial \tau} [C_H(t - \tau_1) - C_H(\tau - \tau_1)] d\tau \end{aligned} \quad (13)$$

где $C_{\min}(t - \tau)$ принимается в форме (5), а $C_H(t - \tau_1) - C_H(\tau - \tau_1)$ — в виде (12).

Теоретические кривые деформаций, рассчитанные на основе (13) с учетом (5), (7), (8) и (12), обозначены на фиг. 4 и 5 цифрой 3.

IV. Функция $C_{\min}(t - \tau)$ записывается на основе теории упругой наследственности, а нелинейные деформации определяются на основе следующих закономерностей, выявленных в описываемых опытах.

1. Приращение $\Delta \varepsilon_H(t)$ к моменту времени $t > \tau_k$ нелинейной составляющей деформаций ползучести, вызываемое увеличением напряжений $\Delta \sigma(\tau_k) = \sigma(\tau_k) - \sigma(\tau_{k-1})$ в момент времени τ_k , пропорционально приращению нелинейной функции напряжений:

$$\Delta f[\sigma(\tau_k)] = f[\sigma(\tau_k)] - f[\sigma(\tau_{k-1})]$$

2. Нелинейные деформации $\Delta \varepsilon_H(t)$, вызванные приращением напряжений $\Delta \sigma(\tau_k)$ сверх предшествующих максимальных напряжений $\sigma_{\max}(\tau_i)$ развиваются, как в свежезагруженном образце, по закону нелинейной теории упругой наследственности.

3. В случае, когда напряжения, с учетом их приращений, оказываются ниже $\sigma_{\max}(\tau_i)$ или только достигают их, нелинейные деформации $\Delta \varepsilon_H(t)$, вызываемые приращениями $\Delta \sigma(\tau_k)$, развиваются также по закону нелинейной теории упругой наследственности, но с учетом фактической длительности Δt_i ранее действовавших приращений $\Delta \sigma(\tau_i) = \Delta \sigma(\tau_k)$. Таким образом, в этом случае деформация $\Delta \varepsilon_H(t)$ численно равна нелинейной составляющей деформаций ползучести в момент времени t образца, впервые загруженного постоянными напряжениями $\Delta \sigma(\tau_k)$, начиная с момента времени $\tau_k - \Delta t_i$.

4. На периоде отдыха образца от данного приращения напряжений $\bar{\Delta}\sigma(\tau_k)$ приращения деформаций $\Delta\varepsilon_{11}(t)$ сохраняют неизменной свою величину, накопленную к моменту этой частичной разгрузки.

С учетом изложенного нелинейные деформации, например, для режима загрузки образца $P_n - 1$ (фиг. 4а), будут равны

$$\varepsilon_{11}(t) = f[\sigma(\tau_2)] C_{11}(t - \tau_1) + \{f[\sigma(\tau_1)] - f[\sigma(\tau_2)]\} C_{11}[t - (\tau_3 - \tau_2) - (\tau_3 - \tau_4) - (\tau_7 - \tau_6) - \tau_1] + \{f[\sigma(\tau_7)] - f[\sigma(\tau_1)]\} C_{11}(t - \tau_1) \quad (14)$$

В случае непрерывно изменяющихся напряжений деформации $\varepsilon_{11}(t)$ всегда можно вычислить с требуемой точностью на основе выражения, аналогичного (14), заменив плавный график напряжений ступенчатым.

Теоретические кривые деформаций, рассчитанные на основе 4-го варианта при записи $\varepsilon_{11}(t)$ в виде выражений, аналогичных (14) с учетом (5) — (8), обозначены на фиг. 4 и 5 цифрой 4.

Из фиг. 4 и 5 следует, что с увеличением числа повторений загрузок приращения деформаций ползучести приближаются по величине к деформациям последствия, что наблюдалось также и в работе (5). Но, как было отмечено выше, при достаточно продолжительном предшествующем нагружении, деформации последствия можно считать линейно зависящими от действовавших напряжений. Следовательно, на циклах нагружения, предшествующих повторным нагрузкам, должно было происходить последовательное отжатие необратимой части деформаций ползучести, определяющей их нелинейность.

Для суждения о влиянии начального цикла нагрузки на развитие деформаций ползучести на каждом повторном нагружении образцов режимов $P_n - 2$ и $P_n - 4$ напряжениями одного и того же уровня были определены приращения удельных деформаций ползучести $\bar{C}(\sigma, t - \tau)$, которые затем сравнивались с $C_{\min}(t - \tau)$ (табл. 1). Значения $\bar{C}(\sigma, t - \tau)$ вычислялись без учета предшествующей разгрузки, т. е. отсчеты этих приращений деформаций производились от соответствующих горизонтальных прямых, а не от продолжения кривых последствия. Это не должно было привести к ощутимым погрешностям, поскольку продолжительность каждого предшествующего отдыха была достаточной для проявления большей части деформаций последствия.

Величины приращений деформаций ползучести, определенных таким способом, как видно из табл. 1, уже на втором цикле нагружения образцов режима $P_n - 2$ оказались близкими к значениям $C_{\min}(t - \tau)$. Некоторое превышение этих деформаций над $C_{\min}(t - \tau)$ объясняется, во-видимому, тем, что они включают в себя какую-то часть еще развивающихся необратимых деформаций ползучести, проявление которых не успело закончиться на начальном участке загрузки из-за недостаточной для этого его продолжительности. С увеличением же числа

повторений нагружений доля этих необратимых деформаций в общей величине приращений деформаций ползучести, развивающихся с момента повторного нагружения, уменьшается, а сами приращения все больше приближаются по величине к $C_{\min}(t-\tau)$.

Вместе с тем, можно отметить, что чем выше уровень действующих напряжений (образцы режима P_{II-4}), тем большее число повторений нагружений, а, следовательно, и большая продолжительность действия нагрузки необходимы для полного отжатия необратимых деформаций ползучести. Даже при 4-м повторном нагружении до уровня напряжений $\sigma \approx 0.8R_{np}$ разница в величинах деформаций $\bar{C}(\sigma, t-\tau)$ с этого момента и $C_{\min}(t-\tau)$ довольно значительна. При периодическом воздействии напряжений, больших предела длительной прочности бетона, достижение равенства величин $\bar{C}(\sigma, t-\tau)$ и $C_{\min}(t-\tau)$, очевидно, вообще невозможно.

Таблица 1

Влияние предшествующих циклов нагружения на величину деформаций $\bar{C}(\sigma, t-\tau)$, развивающихся за время $(t-\tau)$ с момента повторного нагружения

| $t-\tau$ (в сут.) | $C_{\min}(t-\tau)$ ($\kappa\Gamma/\text{см}^2$) ⁻¹ | $\bar{C}(\sigma, t-\tau) \cdot 10^{-7}$ в ($\kappa\Gamma/\text{см}^2$) ⁻¹ с моментов времени τ (в сут.), равных: | | | | | | | | $\frac{\bar{C}(\sigma, t-\tau)}{C_{\min}(t-\tau)}$ для моментов времени τ (в сут.), равных: | | | | | | | |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|-------|------------------|------|------|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------------------|------|-----|-----|
| | | Режим P_{II-2} | | | | Режим P_{II-4} | | | | Режим P_{II-2} | | | | Режим P_{II-4} | | | |
| | | 272 | 300 | 328 | | 272 | 300 | 328 | 356 | 272 | 300 | 328 | | 272 | 300 | 328 | 356 |
| 1 | 2.80 | 6.58 | 3.76 | 3.38 | 13.03 | 6.15 | 5.61 | 5.03 | 2.35 | 1.34 | 1.21 | 4.65 | 2.20 | 2.00 | 1.80 | | |
| 2 | 3.50 | 7.46 | 4.17 | 3.83 | 14.37 | 6.71 | 6.14 | 5.55 | 2.13 | 1.19 | 1.09 | 4.11 | 1.92 | 1.75 | 1.59 | | |
| 3 | 3.85 | 7.97 | 4.55 | 4.06 | 15.17 | 7.18 | 6.47 | 5.89 | 2.07 | 1.18 | 1.05 | 3.94 | 1.86 | 1.68 | 1.53 | | |
| 6 | 4.70 | 8.99 | 5.17 | 4.66 | 16.69 | 7.87 | 7.05 | 6.45 | 1.91 | 1.10 | 0.99 | 3.55 | 1.67 | 1.50 | 1.37 | | |
| 10 | 5.35 | 9.91 | 5.70 | 5.11 | 18.01 | 8.58 | 7.54 | 7.00 | 1.85 | 1.07 | 0.96 | 3.37 | 1.60 | 1.41 | 1.31 | | |
| 14 | 5.84 | 10.51 | 6.17 | 5.46 | 18.85 | 9.10 | 7.93 | 7.42 | 1.80 | 1.06 | 0.93 | 3.23 | 1.56 | 1.36 | 1.27 | | |

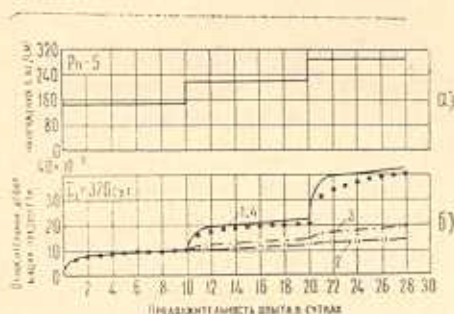
Таким образом, если бы время действия начальной степени нагрузки было достаточным для полного проявления необратимой составляющей деформаций ползучести, то можно думать, что при повторных нагружениях напряжениями, не превышающими первоначального их уровня, деформирование бетона будет происходить по закономерностям линейной теории упругой наследственности с ядром ползучести, основаным на $C_{\min}(t-\tau)$.

Поскольку при повторных воздействиях напряжений одного уровня лишь после отжатия необратимой части длительных деформаций бетон ведет себя как упруго-вязкое тело, то приращения его деформаций ползучести, вызванные некоторыми приращениями напряжений зависят от предыстории нагружения. Это обстоятельство, а также зависимость приращений нелинейных деформаций ползучести от знака приращения напряжений, свидетельствуют о неприменимости принципа на-

ложения воздействий в его общепринятой трактовке для определения $\varepsilon_{tt}(t)$ в случае периодических воздействий нагрузки. Подтверждением сказанному являются ощутимые погрешности, возникающие при сопоставлении экспериментальных кривых деформаций режимных образцов с соответствующими теоретическими кривыми, построенными на основе принципа наложения, что будет показано ниже.

Так как на третьем цикле нагружения (образцы режима P_{n-2}) приращения деформаций $\bar{C}(\sigma, t - \tau)$ незначительно отличались от $C_{\text{пнп}}(t - \tau)$ (табл. 1), то к этому времени, по-видимому, произошло почти полное отжатие их необратимой части, соответствующей уровню напряжений $\sigma = 0.5 R_{\text{пр}}$. Последующее же нагружение напряжениями, большими предыдущих, должно вызывать дополнительное развитие деформаций $\varepsilon_{tt}(t)$, определяющееся только величиной приращения напряжений. Это предположение было проверено экспериментально.

На фиг. 4а приведены режимы нагружения, в которых после 3-кратного воздействия на образцы напряжений $\sigma = 0.5 R_{\text{пр}}$, последние были увеличены до $\sigma = 0.6 R_{\text{пр}}$, а затем до $\sigma = 0.8 R_{\text{пр}}$. Кроме этого был проведен режим нагружения образцов P_{n-5} (фиг. 6), при котором исследовались деформации бетона при ступенчато-возрастающих напряжениях сжатия.



Фиг. 6. Режим нагружения образцов (а) и деформации ползучести (б) при ступенчато-возрастающих напряжениях. Условные обозначения те же, что и на фиг. 4.

Следует отметить, что увеличение первоначального уровня напряжений в образцах режимов P_{n-1} и P_{n-2} и начало опыта с образцами режима нагружения P_{n-5} осуществлялись в возрасте бетона, соответственно равном 356 и 370 сут. Поэтому в возрасте бетона $\tau = 356$ сут. была дополнительно загружена постоянной напряжением сжатия свежая партия призм-близнецов. Полученные данные об их ползучести позволили в последующем скорректировать значения параметров в выражениях (5) и (6) для случаев нагружения после $\tau = 356$ сут. Новые значения этих параметров оказались равными:

$$\begin{aligned} \phi_0 &= 5.3 \cdot 10^{-7} (\text{кг/см}^2)^{-1}; & \Delta_0 &= 3.0 \cdot 10^{-7} (\text{кг/см}^2)^{-1} \\ \tau_0 &= 2.0 (\text{сут.})^{-1}; & \gamma_0 &= 0.018 (\text{сут.})^{-1} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \psi_{II} &= 4,2 \cdot 10^{-12} (\kappa \Gamma / \text{см}^2)^{-1}; & \Delta_{II} &= 9,4 \cdot 10^{-12} (\kappa \Gamma / \text{см}^2)^{-1} \\ \alpha_{II} &= 5 (\text{сут.})^{-1}; & \gamma_{II} &= 0,03 (\text{сут.})^{-1} \end{aligned} \quad (16)$$

В соответствии с этим все теоретические кривые деформаций ползучести образцов режимов P_{II-1} и P_{II-2} с момента времени $\tau = 356$ сут. и образцов режима P_{II-5} рассчитаны с учетом (15) и (16).

Сопоставление экспериментальных кривых деформаций режимных образцов (подвергнутых действию ступенчато-изменяющихся напряжений) с соответствующими теоретическими кривыми, рассчитанными на основе рассмотренных вариантов нелинейной теории упругой наследственности, показывает следующее.

До момента первого изменения напряжений различия в величинах ординат экспериментальных и теоретических кривых деформаций ползучести для всех вариантов одни и те же, и связаны лишь с погрешностями аппроксимации кривых простой ползучести $C(\sigma, t - \tau)$.

С момента первого догружения (фиг. 6) кривые 1, построенные на основе (9), правильно отражают процесс деформирования бетона. Хорошее соответствие между экспериментальными значениями деформаций ползучести и их теоретическими величинами, рассчитанными на основе принципа наложения воздействий в нелинейной постановке, отмечалось также и в ряде других работ. Таким образом, степень нелинейности приращений деформаций ползучести, вызванных приращением возрастающих напряжений соответствует степени нелинейности деформаций ползучести образцов-близнецов, впервые загруженных при тех же по величине напряжениях. Как видно из фиг. 6, только сразу после догружения теоретическая скорость деформирования образцов превышает экспериментальную. В дальнейшем же они выравниваются.

Совершенно иной характер теоретических кривых 1 наблюдается при частичной или полной разгрузке образцов. Как видно из фиг. 4 и 5, кривые 1 значительно преувеличивают эффект последействия. Это становится понятным, если учесть, что зависимость (9) описывает полностью обратимый процесс ползучести. Между тем, как уже отмечалось, обратимость деформаций ползучести можно считать связанной лишь с обратимостью их линейной составляющей. Следовательно, нелинейная теория упругой наследственности дает приемлемые результаты только в случае возрастающих напряжений. Наибольшее расхождение между экспериментальными и теоретическими кривыми деформаций ползучести, имевшее место в проведенных исследованиях, при ступенчато-возрастающих до $\tau = 0,8 R_{IIp}$ напряжениях, составляло 20%. Очевидно, что при описании полных деформаций бетона при отмеченном режиме нагружения расхождения должны быть существенно меньше за счет учета упругих деформаций, соизмеримых с деформациями ползучести. Действительно, в этом случае рассматриваемая разница составляла лишь 7%. В практических же задачах, как правило, оценке подлежат именно полные деформации бетона.

Кривые 2, построенные на основе (10), практически не реагируют на изменение первоначальных напряжений. Это связано с тем, что в опыте как догрузка, так и разгрузка образцов осуществлялась в моменты времени, достаточно удаленные от первоначального нагружения. В этих случаях, как известно, теория старения не способна правильно отразить характер деформирования бетона.

Кривые 3 на фиг. 4 и 5 хорошо соответствуют деформациям режимных образцов при периодическом воздействии напряжений, не превышающих их первоначального уровня. В этом случае обратимость деформаций после полной или частичной разгрузки образцов связана только с обратимостью их линейной части, что хорошо подтверждается опытом. При повторном воздействии напряжений, равных по величине первоначальным, выражение (13) учитывает рост деформаций ползучести на этих этапах на основе $C_{\text{тв}}(t - \tau)$. Приращением же необратимых деформаций, вызванным недостаточной для полного их проявления продолжительностью первоначального нагружения, можно, по-видимому, пренебречь.

На участках воздействия напряжений, превышающих по величине первоначальные, выражение (13) занижает степень нелинейности приращений деформаций ползучести. Погрешности, возникающие при этом, достигают 54%. Величины этих погрешностей, очевидно, зависят от того, насколько велики напряжения, при которых исследуются деформации ползучести, т. е. какую долю в общей величине последних составляет их необратимая часть, так как именно ее недооценивает выражение (13). Отсюда также следует, что степень несоответствия теоретических кривых, построенных на основе (13), экспериментальным кривым может оказаться близкой к той, какая получается при использовании выражения (10). В целом же выражение (13) существенно исправляет погрешности нелинейной теории старения.

Сопоставим теперь экспериментальные кривые деформаций ползучести с теоретическими кривыми 4, построенными на основе 4-го варианта с записью $\varepsilon_{\text{н}}(t)$ в виде выражений, аналогичных (14).

На фиг. 6 кривая 4 совпадает с кривой 1. Это вполне закономерно, поскольку необратимые деформации при неубывающем напряжении не выявляются.

Для режимов $P_{\text{н}}-1$, $P_{\text{н}}-2$, $P_{\text{н}}-3$, $P_{\text{н}}-4$ (фиг. 4—5) кривая 4, практически совпадая с кривой 3 на участках действия напряжений одного уровня, не занижает степени нелинейности приращений деформаций ползучести в дальнейшем, при нагружении напряжениями, превышающими предшествующий максимальный уровень напряжений. Таким образом, рекомендуемый способ вычисления $\varepsilon_{\text{н}}(t)$, основанный на выражениях, аналогичных (14), хорошо отражает наиболее важные особенности процесса длительного деформирования бетона, а именно: необратимость нелинейной составляющей деформаций ползучести при разгрузках (линейность деформаций последствия) и в то же время

сохраняет степень нелинейности приращений деформаций ползучести при соответствующих догрузках образцов. Следовательно, 4-ый вариант теории является более общим, чем (9) и (13) и на его основе можно достичь удовлетворительного соответствия теоретических и экспериментальных кривых деформаций ползучести при различных нагрузках.

В частных случаях воздействия нагрузки, а именно: периодическом нагружении напряжениями одного уровня (при достаточно продолжительном первоначальном участке загрузки) и в случае возрастающих почти до предела длительной прочности бетона напряжений для определения полных деформаций можно пользоваться выражениями соответственно вида (13) и (9).

Научно-исследовательский институт
бетона и железобетона Госстроя СССР

Поступила 9 VII 1970

Ս. Վ. ԱԼԵՔՍԱՆԴՐՈՎՍԿԻ, Ն. Ա. ԿՈԼԵՍՆԻԿՈՎ

ՄԵՐ ԲԵՏՈՆԻ ՍՈՂՔԸ ԲԱՐՁՐ ՄԱԿԱՐԳԱԿԻ ՀԱՍՆՈՂ, ԱՍՏԻՃԱՆԱՅԻՆ
ՓՈՓՈԽՎՈՂ ՍԵՂՄԱՆ ԼԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ԳԵՊՔՈՒՄ

Ա մ փ ո փ ո լ մ

Աշխատանքում շարադրված են բարձր մակարդակի համնոզ, աստիճանային փոփոխվող լարումների դեպքում բետոնի երկարատև դեֆորմացիաների փորձնական և տեսական հետազոտությունների արդյունքները: Դիտարկվում են այդ դեֆորմացիաների նկարագրման համար բետոնի սողքի ժամանակակից ոչ գծային տեսության տարրեր տարատեսակների կիրառման հնարավորությունները և վերլուծվում այդ դեպքում առաջացող սխալների պատճառները:

Ձևակերպված են փորձերով հայտնաբերված օրինաչափությունները, որոնց հետևում է սողքի դեֆորմացիայի անհակադարձելի (ոչ գծային) բաղադրիչը:

Առաջարկված է սողքի ոչ գծային տեսության բարեփոխված տարրերակ, որը հաշվի է առնում այդ օրինաչափությունները, և ցույց է տրված նրա պիտանիությունը բեռնման բազմազան ռեժիմների դեպքում բետոնի երկարատև դեֆորմացիաների նկարագրման համար:

CREEP OF OLD-AGED CONCRETE UNDER STEP-CHANGING COMPRESSED LOAD OF HIGH LEVEL

S. V. ALEXANDROVSKY, N. A. KOLESNIKOV

S u m m a r y

The article is devoted to the results of experimental-theoretical research in concrete long-time deformations with constant and changing compression stresses reaching high level.

It is demonstrated that the region of linear creep does not exist in concrete with physico-mechanical properties practically constant during experiments as well as in concrete that gets older.

It is noted that when discharge of concrete specimens is complete or partial the partial recovery of creep deformations is related to the recovery of their linear component. Non-linear component of the deformations is absolutely non-recovered and conform to the principle of superimposing of loads only in the case of increasing stresses.

Non-recovered deformations conform to other laws, discovered and described by the authors in the formula during the above experiments this happens when repeated loadings interchange cycles of entire or partial discharge.

A comparison of experimental and theoretical curves, built up on the basis of corresponding variants of the modern non-linear theory of creep is given. It is noted that in the case of all the considered conditions of loadings the optimal correspondance to experiments data is reached when the variant of non-linear theory of creep, suggested by the authors, is used.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александровский С. В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на температурные и влажностные воздействия (с учетом ползучести). Стройиздат, 1966.
2. Александровский С. В., Попкова О. М. Нелинейные деформации бетона при сложных режимах загрузки. Бетон и железобетон, № 1, 1970.
3. Арутюнян Н. Х. Некоторые вопросы теории ползучести. Гостехтеориздат, М., 1952.
4. Васильев П. И. К вопросу выбора феноменологической теории ползучести бетона. Ползучесть строительных материалов и конструкций. Стройиздат, 1964.
5. Катин Н. И. Исследование ползучести бетона при высоких напряжениях. Исследование свойств бетона и железобетонных конструкций. Труды НИИЖБ, в. 4, М., 1959.
6. Мельник Р. А. Исследование деформативности и прочности бетона при длительном сжатии. Бетон и железобетон, № 3, 1964.