УДК 666.972:691.32

Н.И. Карпенко, *В.А. Ерышев, *Е.В. Латышева

НИИСФ, *ТГУ

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ БЕТОНА ПРИ РАЗГРУЗКЕ С НАПРЯЖЕНИЙ СЖАТИЯ

Рассмотрены циклы с разными величинами максимальных напряжений, в т.ч. близких к предельным значениям с учетом дилатации бетона. Остаточные деформации при разгрузке определены в приращениях напряжений и деформаций лучевым методом. Установлена связь между начальными модулями упругости бетона и модулем деформаций при разгрузке. Разработаны аналитические зависимости определения величин остаточных деформаций.

Ключевые слова: осевые деформации, поперечные деформации, объемные деформации, напряжения сжатия, лучевой метод, деформирование бетона, бетон.

Диаграммы деформирования бетона, связывающие относительные деформации с напряжениями при одноосном сжатии, находят широкое применение в расчетах бетонных и железобетонных конструкций. Деформированное состояние элементов при центральном сжатии определяется не только продольными ε_b (вдоль действия напряжений), которые имеют отрицательный знак, но и поперечными деформациями ε_p противоположного знака. Связь между этими деформациями устанавливается традиционным путем через коэффициент поперечной деформации μ_b

$$\varepsilon_p = -\varepsilon_b \mu_b. \quad (1)$$

Деформации разных направлений при центральном сжатии вызывают объемные деформации θ , величина которых вычисляется по формуле

$$\theta = \varepsilon_b + 2\varepsilon_p. \quad (2)$$

Деформационные параметры бетона достаточно полно исследованы при статическом нагружении образцов вплоть до разрушения [1, 2]. Методика их определения при разгрузке в нормативной литературе не представлена, что сдерживает развитие методов расчета железобетонных конструкций на нагрузки, которые изменяются по некоторым циклическим закономерностям. Базой для построения расчетных моделей при разгрузке могут служить результаты исследований при кратковременных испытаниях бетонных образцов, где в опытах образец нагружается до заданного уровня напряжений сжатия $\tilde{\sigma}_b$, а затем производится разгрузка. В настоящее время экспериментами авторов научных работ [3—7] установлено, что на величину остаточных деформаций при циклических нагружениях бетонных образцов решающее влияние оказывают микроразрушения бетона при первом нагружении. С ростом числа циклов их величина стабилизируется [8]. Для установления связи между напряжениями и деформационными параметрами необходимо дополнительно выполнить испытания опытных образцов, включающих разгрузку с разных уровней напряжений.

Экспериментальные исследования выполнялись на образцах-призмах размерами $15 \times 15 \times 60$ см, изготовленных из тяжелого бетона в металлических формах. Образцы хранились в лаборатории при комнатной температуре в естественных условиях в течение 28 сут. Одна часть призм подверглась испытаниям статической нагрузкой напряжениями сжатия до разрушения. Другая часть образцов испытывалась с разгрузкой, для чего для каждого образца в диапазоне напряжений $0,4\hat{\sigma}_b \leq \sigma_b < \hat{\sigma}_b$ ($\hat{\sigma}_b$ — предельные напряжения при статическом нагружении до разрушения) назначался максимальный уровень напряжений в циклах $\hat{\sigma}_b$, с которого начиналась разгрузка. Нагружение производилось при пропорциональном увеличении (уменьшении) нагрузки ступенями, составляющим 10 % от разрушающей, с выдержкой на каждой ступени 5 мин. В процессе испытаний по индикаторам часового типа с ценой деления 0,001 мм, установленных на каждой грани образца, измерялись продольные относительные деформации ε_b на базе 300 мм (индикаторы И1, И2, И3 и И4) и относительные поперечные деформации ε_p (рис. 1) на базе 150 мм (индикаторы И5, И6, И7 и И8). Опытные данные по каждой грани обработаны, вычислены средние значения деформаций по четырем граням каждой призмы и представлены в координатах $\varepsilon_p - \eta$ ($\eta = \sigma_b / \hat{\sigma}_b$ — относительный уровень напряжений) и $\varepsilon_b - \eta$ (рис. 2). Методика испытания образцов и обработки опытных данных представлена в работе [9].

Рис. 1. Схема расстановки индикаторов для получения опытных значений продольных ε_b и поперечных ε_p деформаций

По результатам испытаний образцов при статическом нагружении до разрушения определены деформационные и прочностные параметры бетона: начальный модуль деформаций бетона $E_b = 30 \cdot 10^3$ МПа; предельные значения поперечных относительных деформаций $\hat{\varepsilon}_p = 1,06$ ‰; предельные значения осевых относительных деформаций $\hat{\varepsilon}_b = 2,25$ ‰; предельный уровень напряжений $\hat{\sigma}_b = 38,9$ МПа. Из формулы (1) вплоть до разрушения вычислены значения коэффициента поперечных деформаций $\mu_b = \varepsilon_p / \varepsilon_b$, а по формуле (2) — объемные деформации θ .

Рис. 2. Сравнение опытных и расчетных значений деформаций бетона в цикле нагрузки и разгрузки с трех уровней напряжений на диаграммах поперечных деформаций (а), продольных деформаций (б): 1, 1' — исходные диаграммы статического нагружения; 2, 2' — разгрузка по линейному закону; 3, 3' — разгрузка с учетом коэффициента нелинейности

Результаты вычислений в виде опытных их значений представлены в координатах $\mu_b - \eta$ и $\theta - \eta$ (рис. 3). Экспериментальные исследования показывают, что с увеличением уровня напряжения сжатия коэффициент поперечной деформации μ_b возрастает от некоторого начального значения $\mu_b^0 = 0,18 \dots 0,2$ до предельных значений $\hat{\mu}_b = 0,47$.

В начале нагружения, как и положено при сжатии, объем уменьшается (θ — является отрицательной величиной), затем уменьшение объема затормаживается и приходит в состояние $\theta_{\min}$, а до стадии разрушения начинается интенсивный рост объема. Замедление уменьшения объема сопровождается накоплением в структуре бетона микротрещин и повреждений.

Точка $\theta_{\min}$ по О.Я. Бергу [10] соответствует верхней параметрической точке R_t^v (до этой границы бетон моделируется однородной сплошной средой). По напряжениям в этой точке в некоторых случаях судят о некотором безопасном уровне напряжений, пределе стабильности при повторных нагрузках [8, 11] и долговечности [1]. По опытным данным $R_t^v = 31,9$ МПа ($\eta_t^v = 0,82$).

Для построения расчетных зависимостей изменения деформационных параметров при разгрузке необходимо иметь аналитические зависимости, устанавливающие связь между их значениями и уровнями напряжений при статическом нагружении вплоть до разрушения. В работах большинства авторов предлагались или совершенствовались ранее предложенные феноменологические зависимости в виде полиномов, степенных, дробных и других функций. Наиболее полно ряду важных условий отвечает зависимости, предложенные в [1].

Рис. 3. Сравнение опытных и расчетных деформационных параметров: коэффициента поперечных деформаций μ_b (а); объемных деформаций (б); 1, 1' — при нагрузке с ростом напряжений; 2, 2' — при разгрузке с трех уровней напряжений

При центральном сжатии диаграмма деформирования бетона представляется в виде

$$\varepsilon_b = \frac{\sigma_b}{E_b \nu_b}, \quad (3)$$

где E_b — начальный модуль упругости бетона; ν_b — коэффициент изменения секущего модуля ($E_b \nu_b$ — секущий модуль);

$$\nu_b = \hat{\nu}_b + (\nu_0 - \hat{\nu}_b) \sqrt{1 - \omega_1 \eta - \omega_2 \eta^2}, \quad (4)$$

где $1 \geq \nu_b \geq 0$; $\hat{\nu}_b$ — значение коэффициента изменения секущего модуля ν_b в вершине диаграммы; ν_0 — значение коэффициента ν_b в начале диаграммы; η — уровень напряжений ($0 \leq \eta \leq 1$); ω_1, ω_2 — параметры кривизны диаграммы:

$$\hat{\nu}_b = \frac{\hat{\sigma}_b}{\hat{\varepsilon}_b E_b}; \quad \eta_b = \frac{\sigma_b}{\hat{\sigma}_b}; \quad (5)$$

$$\omega_1 = 2 - 2,5\hat{\nu}_b; \quad \omega_2 = 1 - \omega_1. \quad (6)$$

Для восходящей ветви: ($|\varepsilon_b| \leq |\hat{\varepsilon}_b|$); $\nu_0 = 1$; $\hat{\varepsilon}_b$ — деформации в вершине диаграммы.

Аналитическая зависимость связи между деформациями ε_b и напряжениями σ_b в виде (3), с учетом (4), удовлетворительно описывает опытные данные статического нагружения образцов до разрушения (см. рис. 2, б). Расчетную диаграмму принимаем за исходную, которая включает значения деформаций $\hat{\varepsilon}_b$ на начало разгрузки в зависимости от назначенного уровня напряжений $\hat{\sigma}_b$ и определяет одну из граничных точек теоретических ветвей разгрузки. Соответствие опытных и расчетных значений μ_b диаграммы $\mu_b - \eta$ (ветвь $\mu_b^0 h$, (см. рис. 3, а)) удовлетворительно отражает зависимость

$$\mu_b = \hat{\mu}_b + (\mu_b^0 - \hat{\mu}_b)\sqrt{1-\eta^3}, \quad (7)$$

где $\hat{\mu}_b$ — значение коэффициента μ_b в вершине диаграммы (т. h) определяется по формуле

$$\hat{\mu}_b \approx \mu_b^0 + 1 - \sqrt[3]{v_b^2}. \quad (8)$$

Формула (1) с учетом зависимостей (3) для осевых деформаций ε_b и (7) для μ_b описывает восходящую ветвь OP исходной диаграммы поперечных деформаций $\varepsilon_p - \eta$, которая отражает их нелинейный характер изменения с ростом уровня напряжений и соответствует опытным данным (см. рис. 2, a). Расчетные значения предельных поперечных деформаций $\hat{\varepsilon}_p = 1,13\%$ определены по формуле (1) при $\varepsilon_b = \hat{\varepsilon}_b = 2,25\%$ и $\mu_b = \hat{\mu}_b$. Предельные значения коэффициента поперечных деформаций $\hat{\mu}_b = 0,51$ вычислены по формуле (8), где принято $\mu_b^0 = 0,2$, а по зависимости (5) определен коэффициент $\hat{v}_b = 0,58$. Опытные значения этих параметров составляют: $\hat{\varepsilon}_p = 1,06\%$, $\hat{\mu}_b = 0,47$.

На исходных диаграммах $\varepsilon_p - \eta$ (ветвь OP , см. рис. 2, a) и $\varepsilon_b - \eta$ (ветвь Oh , см. рис. 2, b), построенных, соответственно, с учетом зависимостей (1), (3), (7) и (3)—(6), выделим три уровня максимальных напряжений в циклах $\tilde{\eta}_1 = 0,64$; $\tilde{\eta}_2 = 0,85$; $\tilde{\eta}_3 = 0,92$, с которых производилась разгрузка, и нанесем опытные значения деформаций на ступенях разгрузки. Если через опытные значения провести линии, то они имеют вогнутость к оси деформаций, а при полном снятии напряжений сжатия часть деформаций не восстанавливается. С увеличением уровня напряжений на начало разгрузки кривизна кривых и величина остаточных деформаций возрастают.

В [1, 12] предлагались разные способы учета нелинейности кривых разгрузки. Вместе с тем рассматривался и так называемый «лучевой метод» [11], в котором ветви разгрузки и повторного нагружения представлялись отрезками прямых линий (секущими), соединяющими конечные точки в вершинах диаграмм и при полном снятии нагрузки в каждом цикле. На отрезке разгрузки $O_{\Delta b} - O_{\Delta b}^0$ (например, для уровня напряжений $\tilde{\eta}_2 = 0,85$) вводим новую систему координат. Начало координат закрепляем на исходной диаграмме в точке $O_{\Delta b}$ с координатами $\tilde{\eta}_2$ и $\tilde{\varepsilon}_{b2}$, соответствующим началу отрезка разгрузки, направление осей $\tilde{\eta}_{\Delta}$ и $\tilde{\varepsilon}_{\Delta b}$ совпадает с направлением исходных осей η и ε_b . Приращению уровня напряжений $\Delta\tilde{\eta}$ в произвольной точке отрезка разгрузки соответствует приращение деформаций $\Delta\tilde{\varepsilon}_b$, а при $\Delta\tilde{\eta} = \tilde{\eta}_2$, соответственно, $\Delta\tilde{\varepsilon}_b^0$ — приращение деформаций в новой системе координат при полном снятии напряжений сжатия (отрезок $O_{\Delta b}^0 - \tilde{\varepsilon}_{b2}$).

Соотношение между приращениями напряжений $\Delta\tilde{\sigma}_b$ и деформаций $\Delta\tilde{\varepsilon}_b$ в новой системе координат записывается в виде (3) с заменой секущего модуля $E_b v_b$ на секущий модуль $\bar{E}_b$ ветви разгрузки в цикле, который определяется углом наклона α отрезка разгрузки к оси деформаций

$$\Delta\tilde{\varepsilon}_b = \frac{\Delta\tilde{\sigma}_b}{\bar{E}_b}, \quad (9)$$

где $\Delta\tilde{\varepsilon}_b$ принимает отрицательные значения, так как разгрузка имеет противоположное направление осям $\tilde{\eta}_{\Delta}$ и $\tilde{\varepsilon}_{\Delta b}$.

Устанавливается связь между секущим модулем при разгрузке и модулем деформаций бетона E_b в виде

$$\bar{E}_b = \gamma E_b, \quad (10)$$

где на основании опытных данных принимается $\gamma = \sqrt{\bar{\eta}_b} / 0,95$.

С ростом уровня нагружения η , согласно формуле (4), значение v_b уменьшается, соответственно, уменьшается угол наклона α отрезка разгрузки к оси деформаций и значение секущего модуля при разгрузке $\bar{E}_b$. Так, при разгрузке с уровня напряжения $\bar{\eta}_2$ соотношение $\bar{E}_b/E_b$ составляет 0,92, а с уровня напряжений $\bar{\eta}_3$, соответственно, 0,89 (рис. 4, а).

Рис. 4. Деформационные параметры бетона при нагрузке и разгрузке в зависимости от максимального уровня напряжений в цикле: а — отношение секущего модуля деформаций при разгрузке к начальному модулю деформаций при статическом нагружении; б — остаточные поперечные деформации ϵ_p^0 (1) и нелинейная часть полных деформаций, накопленных на ветви нагрузки $\tilde{\epsilon}_p^n$ (2); в — то же осевых деформаций ϵ_b^0 (3) и $\tilde{\epsilon}_b^n$ (4)

Текущие значения остаточных деформаций $\bar{\epsilon}_b$ в исходной системе координат при снятии нагрузки определяются из равенства

$$\bar{\epsilon}_b = \tilde{\epsilon}_b + \Delta \bar{\sigma}_b / \bar{E}_b. \quad (11)$$

Расчетные отрезки лучевого метода (см. рис. 2) с достаточной точностью совпадают с опытными на концах отрезков, однако промежуточные значения на 6...7 % меньше опытных.

Криволинейный характер изменения деформаций при разгрузке можно учесть, введя в формулу (11) нелинейный коэффициент

$$\bar{\epsilon}_b = \tilde{\epsilon}_b + \frac{\Delta \bar{\sigma}_b \beta}{\bar{E}_b}, \quad (12)$$

где на основании опытных данных принимаем $\beta = \sqrt{\frac{\Delta \bar{\eta}}{\bar{\eta}}}$.

Расчетные кривые с учетом коэффициента β более точно отражают характер изменения деформаций на ветвях разгрузки. Для определения остаточных деформаций ε_b^0 при полном снятии нагрузки формулы (11) и (12) примут вид

$$\varepsilon_b^0 = \tilde{\varepsilon}_b - \tilde{\sigma}_b / \tilde{E}_b, \quad (13)$$

где $\tilde{\varepsilon}_b$ — вычисляется по формуле (3); $\tilde{E}_b$ — по формуле (10); $\tilde{\sigma}_b$ — максимальный уровень напряжений на начало разгрузки (задается режимом нагружения).

Для разработки алгоритма вычисления остаточных поперечных деформаций $\tilde{\varepsilon}_p$ полагаем, что связь в виде (1) остается справедливой и при разгрузке:

$$\tilde{\varepsilon}_p = -\tilde{\mu}_b \tilde{\varepsilon}_b. \quad (14)$$

Методику вычисления $\tilde{\mu}_b$ строим в координатных осях $\tilde{\eta}_\Delta - \tilde{\mu}_\Delta$, которые закрепляем на уровне напряжений на начало разгрузки $\tilde{\eta}$ (например, при $\tilde{\eta}_2 = 0,85$) в точке $O_{\Delta\mu}$. Приращению уровня напряжений $\Delta\tilde{\eta}$ при разгрузке соответствует приращение значений коэффициента $\Delta\tilde{\mu}_b = \tilde{\mu}_b - \tilde{\mu}_b^0$. Опытные данные свидетельствуют, что коэффициент $\tilde{\mu}_b$ при разгрузке от начального значения $\tilde{\mu}_b$ не изменяется до полного снятия напряжений с низких уровней (например, при $\tilde{\eta}_1 = 0,64$). С увеличением уровня напряжений на начало разгрузки (например, при $\tilde{\eta}_2 = 0,85$ или $\tilde{\eta}_3 = 0,92$) значение коэффициента $\tilde{\mu}_b$ увеличивается, особенно значительно в конце разгрузки (см. рис. 3, а). Этот фактор удовлетворительно отражает зависимость

$$\tilde{\mu}_b = \tilde{\mu}_b^0 + (\tilde{\mu}_b - \tilde{\mu}_b^0) \sqrt{\frac{\tilde{\eta} - \Delta\tilde{\eta}}{\tilde{\eta}}}, \quad (15)$$

где на основании опытных данных предельное значение $\tilde{\mu}_b^0$ в новой системе координат при $\Delta\tilde{\eta} = \tilde{\eta}$ вычисляется по формуле

$$\tilde{\mu}_b^0 = \frac{\tilde{\mu}_b}{\sqrt[3]{1 - \tilde{\eta}^3}}. \quad (16)$$

Формула (14) для определения остаточных поперечных деформаций при полном снятии напряжений сжатия примет вид

$$\varepsilon_p^0 = \varepsilon_b^0 \tilde{\mu}_b^0, \quad (17)$$

где ε_b^0 — остаточные осевые деформации при полном снятии нагрузки вычисляются по формуле (13); $\tilde{\mu}_b^0$ — значение $\tilde{\mu}_b$ при полной разгрузке, определяется по зависимости (16).

Расчетные кривые разгрузки поперечных деформаций по формуле (14) с учетом (15) и (16) отражают общие закономерности изменения опытных значений и в значительной степени им соответствуют.

Величины осевых ε_b^0 и поперечных ε_p^0 остаточных деформаций при полном снятии нагрузки возрастают с увеличением уровня напряжений $\tilde{\eta}$ на начало разгрузки (см. рис. 4, б), а их расчетные значения по формулам (13) и (17) согласуются с опытными данными. Диаграммы $\varepsilon_b^0 - \tilde{\eta}$ и $\varepsilon_p^0 - \tilde{\eta}$ имеют вид монотонных кривых по характеру подобным их исходным диаграммам статиче-

ского нагружения и характеризует величину невосстановленных нелинейных деформаций в осевом и поперечном направлениях, которые являются частью деформаций, накопленных в образце при статическом нагружении до уровня напряжений $\tilde{\eta}$. Для каждого уровня напряжений на начало разгрузки можно из полных деформаций $\tilde{\varepsilon}_b$ и $\tilde{\varepsilon}_p$ выделить нелинейные деформации $\tilde{\varepsilon}_b^n$ и $\tilde{\varepsilon}_p^n$ соответственно.

$$\tilde{\varepsilon}_b^n = \tilde{\varepsilon}_b - \tilde{\varepsilon}_b^y \text{ или } \tilde{\varepsilon}_b^n = \frac{\tilde{\sigma}_b}{E_b} \left(\frac{1}{\tilde{\nu}_b} - 1 \right); \quad (18)$$

$$\tilde{\varepsilon}_p^n = \tilde{\varepsilon}_p - \mu_b^0 \tilde{\varepsilon}_b^y \text{ или } \tilde{\varepsilon}_p^n = \tilde{\varepsilon}_p - 0,2 \frac{\tilde{\sigma}_b}{E_b}, \quad (19)$$

где $\tilde{\varepsilon}_b^y$ — упругие деформации на начало разгрузки.

Если на низких уровнях напряжений нелинейные деформации не восстанавливаются полностью, то на высоких — только их часть (см. рис. 4, б). В отдельных отечественных и зарубежных работах соотношение остаточных деформаций к деформациям на начало разгрузки определяют постоянным коэффициентом и значения модулей деформаций при разгрузке принимаются равными начальному модулю деформаций [2, 13]. Исследования свидетельствуют, что эта связь неоднозначная и это соотношение зависит от уровня напряжений на начало разгрузки.

Полученные аналитические зависимости для вычисления деформаций ε_b и ε_p на ветвях нагрузки и разгрузки позволяют по формуле (2) получить расчетные значения объемных деформаций для назначенных режимов нагружения (см. рис. 3, б). Теоретические значения достаточно полно описывают характерные особенности изменения опытных объемных деформаций, в т.ч. при разгрузке, когда объемные деформации восстанавливаются (увеличиваются). Следует отметить, что с ростом уровня напряжений на начало разгрузки доля поперечных деформаций возрастает и при полной разгрузке объемные деформации увеличиваются, а при разгрузке с уровней напряжений, когда проявляется свойство дилатации (например, с $\tilde{\eta}_3 = 0,92$), они меняют свой знак на противоположный, т.е. становятся положительными.

Выводы. 1. Ветви разгрузок при циклических нагружениях бетона напряжениями сжатия рекомендуется представлять отрезками прямых линий, соединяющих точки начала и окончания линейного изменения деформаций.

2. На основании опытных данных получены аналитические выражения определения основных деформационных параметров бетона как при увеличении напряжений сжатия, так и при их снятии. Установлены основные закономерности изменения осевых, поперечных и объемных деформаций с учетом дилатации бетона на ветвях разгрузки.

Библиографический список

1. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М. : Стройиздат, 1996. 416 с.
2. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Расчетные модели силового сопротивления железобетона. М. : Изд-во АСВ, 2004. 471 с.

3. *Ставров Г.Н., Руденко В.В., Федосеев А.А.* Прочность и деформативность бетона при повторно-статических нагрузках // Бетон и железобетон. 1986. № 1. С. 33—34.
4. *Беккер В.А., Сергеев С.М.* Особенности развития объемных деформаций бетонов при повторном нагружении сжимающей нагрузкой // Известия вузов. Серия Строительство и архитектура. 1983. № 10. С. 6—10.
5. *Меркин А.П., Фокин Г.А.* Кинетика разрушения бетона при циклических нагружениях // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1982. № 1. С. 75—77.
6. *Кузовчикова Е.А., Яшин А.В.* Исследование влияния малоцикловых сжимающих воздействий на деформативность, прочность и структурные изменения бетона // Известия вузов. Серия Строительство и архитектура. 1986. № 10. С. 30—33.
7. *Расторгуев Б.С., Яковлев С.К.* Совершенствование метода расчета рамных каркасов при малоцикловых нагружениях // Исследования каркасных конструкций многоэтажных производственных зданий. 1985. С. 117—126.
8. *Бабич Е.М., Погорелая А.П., Залесов А.С.* Работа элементов на поперечную силу при многократно повторных нагружениях // Бетон и железобетон. 1981. № 6. С. 8—10.
9. *Ерышев В.А., Латышева Е.В., Бондаренко А.С.* Методика экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния линейных железобетонных элементов при осевом нагружении повторными и знакопеременными нагрузками // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2010. № 3 (13). С. 51—56.
10. *Берг О.Я., Щербаков Е.Н., Писанко Г.Н.* Высокопрочный бетон. М.: Стройиздат, 1971. 208 с.
11. *Карпенко Н.И., Ерышев В.А., Латышева Е.В.* К построению диаграмм деформирования бетона повторными нагрузками сжатия при постоянных уровнях напряжений // Строительные материалы. 2013. № 6. С. 48—52.
12. *Ерышев В.А., Тошин Д.С.* Диаграмма деформирования бетона при многократных повторных нагрузках // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2005. № 10. С. 109—114.
13. *Hillerborg A.* Analysis of one single crack. Report to RILEM. Tl. 50-FMC. 1981, p. 21.

Поступила в редакцию в январе 2014 г.

Об авторах: **Карпенко Николай Иванович** — доктор технических наук, профессор, академик РААСН, Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (ФГБУ «НИИСФ РААСН»), 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, д. 21, niisf@niisf.ru;

Ерышев Валерий Алексеевич — доктор технических наук, профессор, советник РААСН, профессор кафедры городского строительства и хозяйства, Тольяттинский государственный университет (ТГУ), 445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, д. 14, gsx@tltsu.ru;

Латышева Екатерина Валериевна — кандидат технических наук, доцент кафедры городского строительства и хозяйства, Тольяттинский государственный университет (ТГУ), 445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, д. 14, p-tata@mail.ru.

Для цитирования: *Карпенко Н.И., Ерышев В.А., Латышева Е.В.* Методика расчета параметров деформирования бетона при разгрузке с напряжений сжатия // Вестник МГСУ. 2014. № 3. С. 168—178.

N.I. Karpenko, V.A. Eryshev, E.V. Latysheva

**METHOD OF CALCULATING THE PARAMETERS OF CONCRETE DEFORMATION
IN CASE OF UNLOADING FROM COMPRESSIVE STRESS**

Deformation parameters of concrete are adequately studied under static uploading of samples until fracture. Methods of their determination during unloading (primarily due to the lack of experimental data) is not presented in the regulatory and scientific literature. That hinders the development of calculating methods of loadings for reinforced concrete structures, which vary according to certain cyclical regularities. The basis for computational models development for unloading are the results of the studies with short-term tests of concrete samples, where the sample is loaded to a predetermined level of compressive stresses, and then it is unloaded.

The purpose of the research is to establish an analytical connection between stress and deformation parameters of concrete on axial loading and unloading branches with compressive stresses. The subject of the study is: axial and transverse deformation coefficient of transverse deformation volume deformations.

The treated cycles have different values of maximum stress, including close to the limit values, taking into account the dilation of concrete. Permanent deformations during unloading are determined in increments of stress and strain by radial method. A connection is established between the initial elastic modulus of concrete and the modulus of deformation during unloading.

On the basis of experimental data the analytical determination of the quantities depending on the residual strains for partial or complete unloading was offered. It was found out that in case of increasing stress level at the beginning of unloading the share of transverse strain increases and in case of full unloading, volume deformations increase. In case of unloading from the stress level, when dilatation property is manifested, they change the sign to the opposite, which is, become positive. The authors show a comparison of calculation results of the proposed method with experimental data obtained.

Key words: axial deformation, lateral deformation, volume deformations, compression stress, radial method, deformation of concrete concrete.

References

1. Karpenko N.I. *Obshchie modeli mekhaniki zhelezobetona* [General Mechanics Model of Reinforced Concrete]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1996, 416 p.
2. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. *Raschetnye modeli silovogo soprotivleniya zhelezobetona* [Computational Models of the Power Resistance of Reinforced Concrete. Moscow, ASV Publ., 2004, 471 p.
3. Stavrov G.N., Rudenko V.V., Fedoseev A.A. Prochnost' i deformativnost' betona pri povtorno-staticheskikh nagruzkakh [Strength and Deformability of Concrete at Re-static Loads]. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 1986, no. 1, pp. 33—34.
4. Bekker V.A., Sergeev S.M. Osobennosti razvitiya ob'emnykh deformatsiy betonov pri povtornom nagruzhении szhimayushchey nagruzkoy [Development Features of Volume Deformations of Concrete under Repeated Loading by Compressive Load]. *Izvestiya vuzov. Seriya Stroitel'stvo i arkhitektura* [News of Higher Education Institutions. Series: Construction and Architecture]. 1983, no. 10, pp. 6—10.
5. Merkin A.P., Fokin G.A. Kinetika razrusheniya betona pri tsiklicheskh nagruzheniakh [Kinetics of Concrete Destruction under Cyclic Loading]. *Izvestiya vuzov. Seriya Stroitel'stvo i arkhitektura* [News of Higher Education Institutions. Series: Construction and Architecture]. 1982, no. 1, pp. 75—77.
6. Kuzovchikova E.A., Yashin A.V. Issledovanie vliyaniya malotsiklovyykh szhimayushchikh vozdeystviy na deformativnost', prochnost' i strukturnye izmeneniya betona [Investigation of Influence of Low-cycle Compressive Effects on Deformation, Strength and Structural Changes of Concrete]. *Izvestiya vuzov. Seriya Stroitel'stvo i arkhitektura* [News of Higher Education Institutions. Series: Construction and Architecture]. 1986, no. 10, pp. 30—33.

7. Rastorguev B.S., Yakovlev S.K. Sovershenstvovanie metoda rascheta ramnykh karkasov pri malotsiklovyykh nagruzheniyakh [Improving the Method of Calculating Framework at Low-cycle Loading]. *Issledovaniya karkasnykh konstruksiy mnogoetazhnykh proizvodstvennykh zdaniy* [Research of Frame Structures of Multi-storey Industrial Buildings]. 1985, pp. 117—126.

8. Babich E.M., Pogorelyak A.P., Zalesov A.S. Rabota elementov na poperechnuyu silu pri nemnogokratno povtornykh nagruzheniyakh [Work of the Elements on the Transverse Force in Case of not Frequently Repeated Loadings]. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 1981, no. 6, pp. 8—10.

9. Eryshev V.A., Latysheva E.V., Bondarenko A.S. Metodika eksperimental'nykh issledovaniy napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya lineynykh zhelezobetonnykh elementov pri osevom zagruzhenii povtornymi i znakoperemennymi nagruzkami [Methodology of Experimental Studies of the Stress-strain State of Linear Reinforced Concrete Elements under Axial Uploading by Repetitive and Alternating Loads]. *Vektor nauki Tol'yatinskogo gosudarstvennoy universiteta* [Vector of Science of the Togliatti State University]. 2010, no. 3 (13), pp. 51—56.

10. Berg O.Ya., Shcherbakov E.N., Pisanko G.N. *Vysokoprochnyy beton* [High-strength Concrete]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1971, 208 p.

11. Karpenko N.I., Eryshev V.A., Latysheva E.V. K postroeniyu diagramm deformirovaniya betona povtornymi nagruzkami szhatiya pri postoyannykh urovnyakh napryazheniy [Developing Concrete Deformation Diagrams by Repeated Compression LOADS at Constant Stress Levels]. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2013, no. 6, pp. 48—52.

12. Eryshev V.A., Toshin D.S. Diagramma deformirovaniya betona pri nemnogokratnykh povtornykh nagruzkakh [Strain Diagram of Concrete at Non-Frequent Repeated Loads]. *Izvestiya vuzov. Seriya Stroitel'stvo* [News of Higher Education Institutions. Series: Construction]. 2005, no. 10, pp. 109—114.

13. Hillerborg A. Analysis of one single crack. Report to RILLEM. TI. 50-FMC. 1981, p. 21.

About the authors: **Karpenko Nikolay Ivanovich** — Doctor of Technical Sciences, Professor, member, Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, **Scientific and Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (NIISF RAASN)**, 21 Lokomotivnyy proezd, Moscow, 127238, Russian Federation; niisf@niisf.ru;

Eryshev Valeriy Alekseevich — Doctor of Technical Sciences, Professor, advisor, Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, **Togliatti State University (TGU)**, 14 Belarusskaya st., Togliatti, 445667, Russian Federation; gsx@tltu.ru;

Latysheva Ekaterina Valer'evna — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, **Togliatti State University (TGU)**, 14 Belarusskaya st., Togliatti, 445667, Russian Federation; p-tata@mail.ru.

For citation: Karpenko N.I., Eryshev V.A., Latysheva E.V. Metodika rascheta parametrov deformirovaniya betona pri razgruzke s napryazheniy szhatiya [Method of Calculating the Parameters of Concrete Deformation in Case of Unloading from Compressive Stress]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2014, no. 3, pp. 168—178.