

УДК 624.04

Ерышев В.А. – доктор технических наук, профессор

E-mail: gsx@tltsu.ru

Латышева Е.В. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: p-tata@mail.ru

Бондаренко А.С. – инженер

Баранова Ю.С. – студент

Тольяттинский государственный университет

Адрес организации: 445667, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, д. 14

Деформационные параметры бетона при разгрузке с напряжений сжатия

Аннотация

Целью исследований является установление аналитической связи между напряжениями и деформационными параметрами бетона при осевом нагружении образцов на ветвях разгрузки с напряжений сжатия. Предметом исследования являются: осевые и поперечные деформации; коэффициент поперечной деформации; объемные деформации.

Рассматриваются циклы с разными величинами максимальных напряжений, в том числе близких к предельным их значениям с учетом дилатации бетона. Остаточные деформации при разгрузке определяются в приращениях напряжений и деформаций лучевым методом. Устанавливается связь между начальными модулями упругости бетона и модулем деформаций при разгрузке.

На основании опытных данных построены аналитические зависимости определения величин остаточных деформаций при частичной или полной разгрузке. Приведены сравнения результатов расчета по предложенной методике с опытными данными, полученными авторами.

Ключевые слова: осевые и поперечные деформации, объемные деформации, напряжения, лучевой метод.

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. Методика их определения при разгрузке (в первую очередь, из-за отсутствия опытных данных) в нормативной и научной 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.

Экспериментальные исследования выполнялись на образцах – призмах размерами 15x15x60 см, изготовленных из тяжелого бетона в металлических формах. Образцы хранились в лаборатории при комнатной температуре в естественных условиях в течение 28 суток. 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 $0,4\hat{\sigma}_b \leq \bar{\sigma}_b < \hat{\sigma}_b$ ($\hat{\sigma}_b$ – предельные напряжения при статическом нагружении до разрушения) назначался максимальный уровень напряжений в циклах $\bar{\sigma}_b$, с которого начиналась разгрузка. Нагружение производилось при пропорциональном увеличении (уменьшении) нагрузки ступенями, составляющими 10 % от разрушающей, с выдержкой на каждой ступени 5 мин. В процессе испытаний по индикаторам часового типа с ценой деления 0,001 мм, установленным 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 а, б).

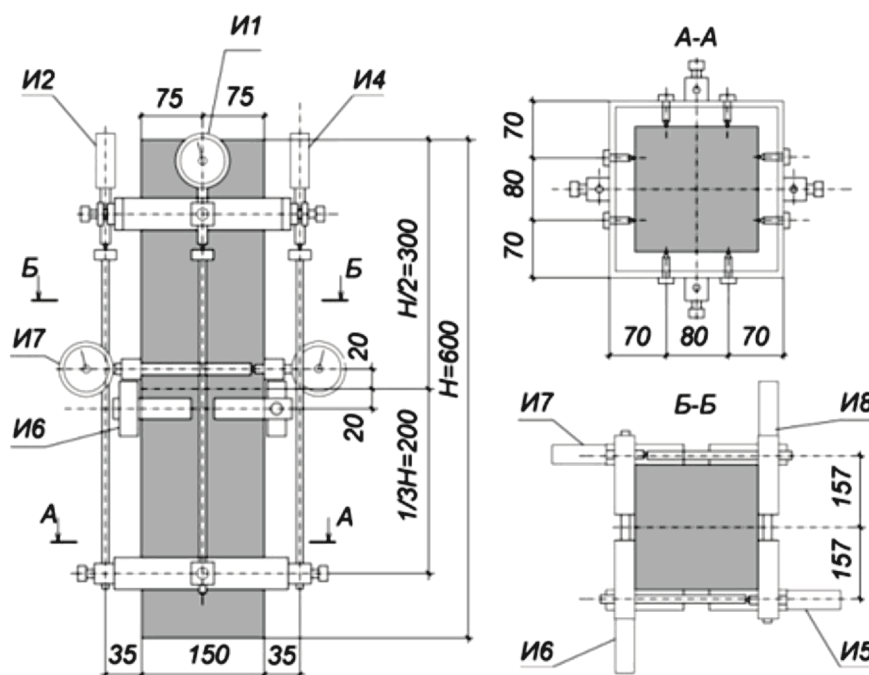


Рис. 1. Схема расстановки индикаторов для получения опытных значений продольных ε_b и поперечных ε_p деформаций

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 . Результаты вычислений в виде опытных их значений представлены в координатах « $\mu_b - \eta$ » и « $\theta - \eta$ » (рис. 3а, б). Экспериментальные исследования показывают, что с увеличением уровня напряжения сжатия коэффициент поперечной деформации μ_b возрастает от некоторого начального значения $\mu_b^0 = 0,18-0,2$ 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 θ_{min} , а до стадии разрушения начинается интенсивный рост объема. Замедление уменьшения объема сопровождается накоплением в структуре бетона микротрещин и повреждений.

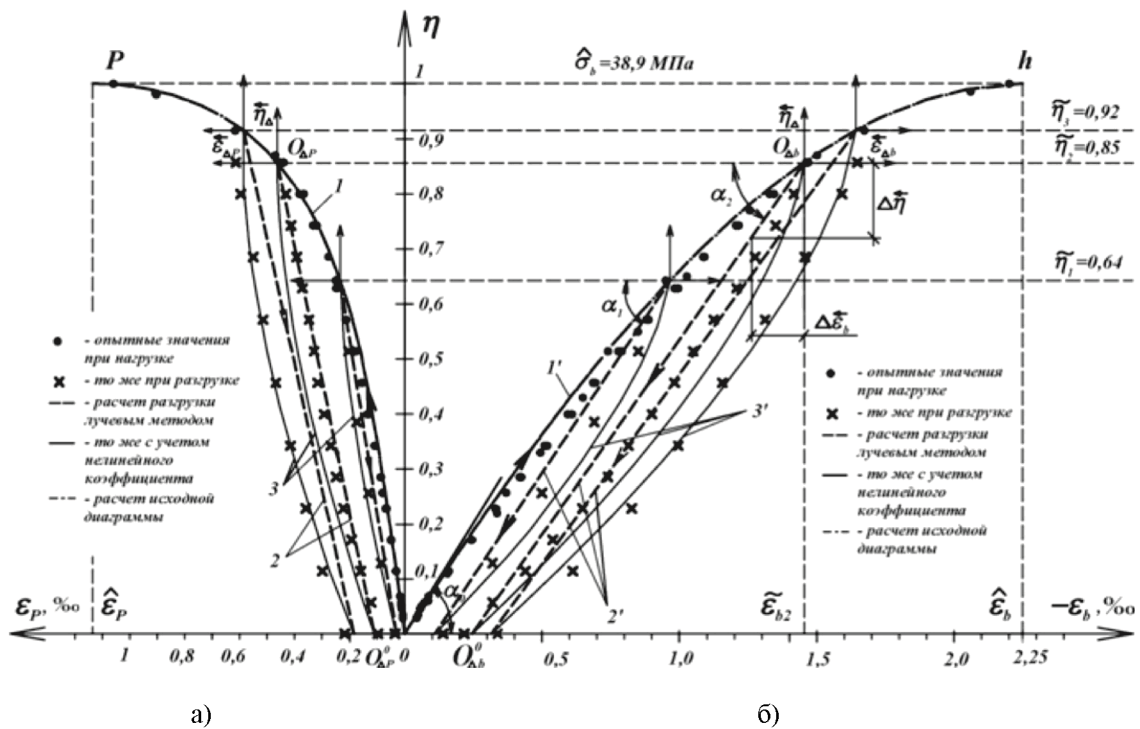


Рис. 2. Сравнение опытных и расчетных значений деформаций бетона в цикле нагрузка и разгрузка с трех уровней напряжений: на диаграмме поперечных деформаций (а); на диаграмме продольных деформаций (б): 1, 1' – исходные диаграммы статического нагружения; 2, 2' – разгрузка по линейному закону; 3, 3' – разгрузка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

Точка θ_{min} по О.Я. Бергу [1] соответствует верхней параметрической точке R_t^y (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 [2] и долговечности [3]. По опытным данным $R_t^y = 31,9$ МПа ($\eta_t^y = 0,82$).

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 отвечают зависимости, предложенные в работе [3].

При центральном сжатии диаграмма деформирования бетона представляется в виде:

$$\varepsilon_b = \frac{\sigma_b}{E_b \nu_b}, \tag{3}$$

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

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

здесь $1 \geq \nu_b \geq 0$; $\hat{\nu}_b$ – 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:

$$\hat{\nu}_b = \frac{\hat{\sigma}_b}{\hat{\varepsilon}_b \cdot E_b}; \eta_b = \frac{\sigma_b}{\hat{\sigma}_b}; \tag{5}$$

$$\omega_1 = 2 - 2,5 \cdot \hat{\nu}_b; \omega_2 = 1 - \omega_1. \tag{6}$$

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

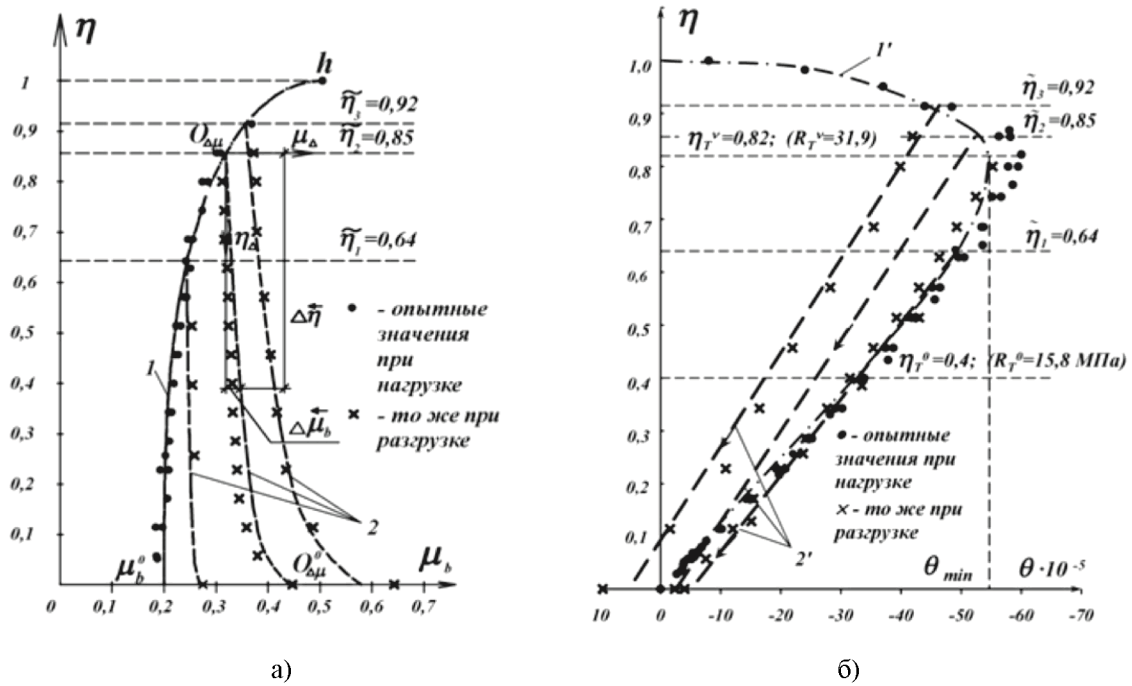


Рис. 3. Сравнение опытных и расчетных деформационных параметров: коэффициента поперечных деформаций μ_b (а); объемных деформаций (б); 1,1' – при нагрузке с ростом напряжений; 2,2' – при разгрузке с трех уровней напряжений

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 (рис. 2б). Расчетную диаграмму принимаем за исходную, которая включает значения деформаций $\tilde{\epsilon}_b$ на начало разгрузки, в зависимости от назначенного уровня напряжений $\tilde{\sigma}_b$, и определяет одну из граничных точек теоретических ветвей разгрузки. Соответствие опытных и расчетных значений μ_b диаграммы « $\mu_b - \eta$ » (ветвь $\mu_b^0 h$, рис. 3а) удовлетворительно отражает зависимость:

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

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

$$\hat{\mu}_b \approx \mu_b^0 + 1 - \sqrt[3]{\hat{\nu}_b^2}. \tag{8}$$

Формула (1) с учетом зависимостей (3) для осевых деформаций ϵ_b и (7) для μ_b описывает восходящую ветвь ОР исходной диаграммы поперечных деформаций « $\epsilon_p - \eta$ », которая отражает их нелинейный характер изменения с ростом уровня напряжений и соответствует опытным данным (рис. 2а). Расчетные значения предельных поперечных деформаций $\hat{\epsilon}_p = 1,13 \%$ определены по формуле (1) при $\epsilon_b = \hat{\epsilon}_b = 2,25 \%$ 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 $\hat{\nu}_b = 0,58$. Опытные значения этих параметров составляют: $\hat{\epsilon}_p = 1,06 \%$, $\hat{\mu}_b = 0,47$.

На исходных диаграммах « $\epsilon_p - \eta$ » (ветвь ОР, рис. 2а) и « $\epsilon_b - \eta$ » (ветвь 0h, рис. 2б), построенных, соответственно, с учетом зависимостей (1), (3), (7) и (3), (4), (5), (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 ранее опубликованных работах [1, 3] предлагались разные способы учета нелинейности кривых разгрузки. Вместе с тем, рассматривался и так называемый

«лучевой метод» [2], 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 $0_{\Delta b} - 0_{\Delta b}^0$ (например, для уровня напряжений $\tilde{\eta}_2 = 0,85$) вводим новую систему координат. Начало координат закрепляем на исходной диаграмме в точке $0_{\Delta b}$ с координатами $\tilde{\eta}_2$ и $\tilde{\varepsilon}_{b2}$, соответствующими 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, $\Delta\varepsilon_b^0$ - приращение деформаций в новой системе координат при полном снятии напряжений сжатия (отрезок $0_{\Delta b}^0 - \tilde{\varepsilon}_{b2}$).

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 $E_b \nu_b$ на секущий модуль \tilde{E}_b ветви разгрузки в цикле, который определяется углом наклона α отрезка разгрузки к оси деформаций:

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

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:

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

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

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

Текущие значения остаточных деформаций $\tilde{\varepsilon}_b$ в исходной системе координат при снятии нагрузки определяются из равенства:

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

Расчетные отрезки лучевого метода (рис. 2а, б) 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:

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

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

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:

$$\varepsilon_b^0 = \tilde{\varepsilon}_b - \tilde{\sigma}_b / \tilde{E}_b. \quad (14)$$

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 $0_{\Delta\mu}$. Приращению уровня напряжений $\Delta\tilde{\eta}$ при разгрузке соответствует приращение значений коэффициента $\Delta\tilde{\mu}_b = \tilde{\mu}_b - \tilde{\mu}_b$. 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 (рис. 3а). 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, а их расчетные значения по формулам (13) и (17) согласуются с опытными данными (рис. 2 а, б).

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 (рис. 3б). Теоретические значения достаточно полно описывают характерные особенности изменения опытных объемных деформаций, в том числе 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.

Список библиографических ссылок

1. Берг О.Я., Щербаков Е.Н., Писанко Г.Н. Высокопрочный бетон. – М.: Стройиздат, 1971. – 208 с.
2. 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.
3. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. – М.: Стройиздат, 1996. – 416 с.

Eryshev V.A. – doctor of technical sciences, professor

E-mail: gsx@tltsu.ru

Latysheva E.V. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: p-tata@mail.ru

Bondarenko A.S. – engineer

Baranova Y.S. – student

Tolyatti State University

The organization address: 445667, Russia, Tolyatti, Belarusskaya st., 14

Expansion options for unloading concrete with compressive stress

Resume

The purpose of researches is the establishment of analytical communication between tension and deformation parameters of concrete in case of axial loading of samples on unloading branches from compression tension. Research objects are: axial and cross deformations; coefficient of cross deformation; volume deformations.

Cycles with different sizes of the maximum tension, including close to their limiting values taking into account a concrete dilatation are considered. Residual deformations when unloading are determined in increments of tension and deformations by a beam method. Connection between initial modules of elasticity of concrete and the module of deformations is established when unloading.

Based on the experimental data analytical dependences of determination of sizes of residual deformations are constructed in case of partial or complete unloading. Comparisons of results of calculation for the offered technique with the experimental data obtained by authors are given.

Keywords: axial and cross deformations, volume deformations, tension, beam's method.

Reference list

1. Berg O.J., Shcherbakov E.N., Pisanko G.N. High-strength concrete. – M.: Stroyizdat, 1971. – 208 p.
2. Karpenko N.I., Eryshev V.A., Latysheva E.V. Construction of concrete deformation diagrams repeated compression loads at constant stress levels // Building Materials, 2013, № 6. – P. 48-52.
3. Karpenko N.I. General mechanics model of reinforced concrete. – M.: Stroyizdat, 1996. – 416 p.