

Совгира Василиса Васильевна, магистр, Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса (Украина)

Совгира Василий Николаевич, канд. техн. наук, доцент, Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса (Украина)

Vasilisa Sovgira, Master of Engineering, Odessa State Academy of Building and Architecture, Odessa (Ukraine)

Vasilyi Sovgira, PhD in Engineering Science, Associate Professor, Odessa State Academy of Building and Architecture, Odessa (Ukraine)

ПОЛНЫЕ ДИАГРАММЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ НЕОДНОРОДНО СЖАТОГО БЕТОНА ПРИ ВНЕЦЕНТРЕННОМ НАГРУЖЕНИИ КОРОТКИХ БЕТОННЫХ КОЛОНН

FULL DEFORMATION DIAGRAMS FOR NON-UNIFORMLY COMPRESSED CONCRETE IN TERMS OF ECCENTRICALLY LOADING OF SHORT CONCRETE COLUMNS

АННОТАЦИЯ

Приведены результаты исследований деформирования и разрушения одноосно и внецентренно сжатого тяжелого бетона призматической прочностью в диапазоне $f_{c15} = 22,2 \dots 65,6$ МПа при «мягком» и «жестком» режиме нагружения. Выполнен анализ его прочностных и упругопластических свойств с учетом влияния значимых факторов и их изменение с ростом нагрузки.

Реализованы экспериментальные исследования полных диаграмм деформирования однородно и неоднородно сжатого бетона с изменением размеров сечений образцов, величины эксцентриситета нагрузки, прочности бетона, режима нагружения. Обоснован выбор феноменологической зависимости между напряжениями и деформациями однородно и неоднородно сжатого бетона.

Предложены аналитические выражения описания опытных полных диаграмм деформирования одноосно и внецентренно сжатого бетона, моделирующие изменение упругопластических свойств на восходящем и нисходящем участке диаграмм $\sigma_c - \varepsilon_{cx}$ и $\sigma_{c,e} - \varepsilon_{cx,e}$ при действии кратковременной статической нагрузки.

Определены выражения полных диаграмм зависимости изменения $\sigma_c/f_c - (E_c^{sek}, \nu_c, K_D)$ одноосно и $\sigma_{c,e}/f_{c,e} - (E_{c,e}^{sek}, \nu_{c,e}, K_{D,e})$ внецентренно сжатого бетона, отражающие процессы развития деструкций (зарождения и интенсивного роста трещин) на субмикро-, микро- и макроуровнях структуры цементного камня и бетона, обуславливающие накопление и развитие пластических псевдодеформаций с ростом уровня нагрузки.

Параметры нелинейных диаграмм изменения секущего модуля деформаций, коэффициента упругости и коэффициента интенсивности развития деструкций выражают нелинейный характер диаграмм деформирования однородно и неоднородно сжатого бетона как выражения, характеризующие изменение упругопластических свойств с ростом нагрузки, входящие в состав аналитических зависимостей $\sigma_c(\varepsilon_c)$.

ABSTRACT

The results of studies of deformation and fracture of uniaxially and eccentrically compressed heavy concrete with prismatic strength in the range $f_{c15} = 22,2 \dots 65,6$ MPa under «soft» and «hard» loading conditions are presented. The analysis of its strength and elastoplastic properties is performed taking into account the influence of significant factors and their change with increasing load.

The experimental studies of the complete deformation diagrams of uniformly and non-uniformly compressed concrete with a change in the dimensions of the sample cross sections, the magnitude of the load eccentricity, the strength of the concrete, the loading regime are realized. The choice of the phenomenological dependence between stresses and deformations of a homogeneously and in homogeneously compressed concrete is substantiated.

Analytic expressions for the description of experimental complete deformation diagrams of uniaxially and eccentrically compressed concrete

modeling the change in elastoplastic properties on the ascending and descending sections of the $\sigma_c - \varepsilon_{cx}$ and $\sigma_{c,e} - \varepsilon_{cx,e}$ diagrams under the action of a short-term static load are proposed.

The expressions for the complete diagrams of the variation of $\sigma_c/f_c - (E_c^{sek}, \nu_c, K_D)$ is uniaxial and $\sigma_{c,e}/f_{c,e} - (E_{c,e}^{sek}, \nu_{c,e}, K_{D,e})$ of eccentrically compressed concrete reflecting the processes of development of destruction (nucleation and intensive growth of cracks) on submicro-, micro- and macrolevels of the structure of cement stone and concrete, which determine the accumulation and development of plastic pseudo-deformations with increasing load level.

The parameters of the nonlinear diagrams of the change in the secant modulus of deformations, the elasticity coefficient, and the intensity of the destructive development rate express the nonlinear character of the deformation diagrams of uniformly and in homogeneously compressed concrete as expressions characterizing the change in the elastoplastic properties that form part of the analytical dependences $\sigma_c(\varepsilon_c)$.

Ключевые слова: тяжелый бетон, короткие колонны, центральное и внецентренное сжатие, режим нагружения, полные диаграммы, секущий модуль, коэффициент упругости, коэффициент развития разрушений.

Keywords: heavy concrete, short columns, uniaxial and eccentrically compression, loading mode, complete diagrams, secant modulus, coefficient of elasticity, coefficient development of destruction.

ВВЕДЕНИЕ

Структура бетона, включающая твердую фазу, поровое пространство и микротрещины с его реологическими свойствами неоднородна, и ее изменение при заданной прочности влияет на деформативность, трещиностойкость, упруго-пластичность и другие свойства, которые учесть в явном виде при аналитическом описании экспериментальных диаграмм сжатия (растяжения) бетона даже с использованием эмпирических выражений сложно. А вопрос экспериментальных исследований полных

диаграмм деформирования одноосного сжатого (растянутого) бетона или их корректного коррелирования для расчетов внецентренно сжатых (изгибаемых) конструкций является актуальным по настоящее время.

Учитывая актуальность вопроса, комплексные экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния центрально и внецентренно сжатых бетонных и железобетонных коротких колонн осуществлялись с использованием механизма перераспределения потенциальной энергии с образцов, не снижая жесткости испытательного оборудования [5–8], осуществлялись в аккредитованной лаборатории кафедры ПСК ОГАСА.

РАЗВИТИЕ ДЕСТРУКЦИЙ И РАЗРУШЕНИЕ НЕОДНОРОДНО СЖАТОГО БЕТОНА ПРИ ВНЕЦЕНТРЕННОМ НАГРУЖЕНИИ БЕТОННЫХ КОРОТКИХ КОЛОНН НА ОСНОВЕ ПОЛНЫХ ДИАГРАММ

На стадии проектирования длительная и безопасная эксплуатация каркасных зданий из бетонных и железобетонных конструкций, как правило, обеспечивается обоснованными решениями аналитических выражений с использованием физико-механических характеристик материалов, нормированных в Строительных Нормах на основании испытания базовых призм небольших размеров при центральном сжатии и растяжении, которые моделируют реальные конструкции. Эти данные неявно учитывают закон упругого подобия, который предполагает полное структурное и механическое подобие свойств материала образцов разных размеров. Именно с этих условий устанавливалась связь между напряжениями и деформациями, определялись предельные усилия, максимальные и предельные деформации, вместе с тем эти характеристики зависят от технологических факторов, прочности бетона, условий хранения, подготовки образцов к испытаниям, испытаний с определенными режимами нагружения и др. факторов. Наряду с этим используемые физико-механические характеристики являются параметрами диаграмм деформирования бетона $\sigma_c - \varepsilon_c$ в условиях однородного напряженно-деформированного состояния (НДС), обозначающих на

заданных уровнях нагрузки зависимость между напряжениями σ_c и деформациями ε_c .

Однако исследования показывают, что даже в лабораторных условиях достичь структурного подобия бетонных образцов практически невозможно. Геометрическое подобие модели и элемента реальной конструкции не обеспечивает их полного механического подобия.

Следовательно, для сопоставительной оценки характера деформирования бетона при однородном и неоднородном напряженном состоянии бетонных коротких колонн проведены комплексные исследования сопротивления бетона при осевом и внецентренном ($e_0 = 0, 1/12h, 1/6h$) сжатии геометрически подобных призматических образцов-близнецов 1–7-ми типоразмеров.

Испытание 7 типоразмеров призматических элементов (262 шт.) из тяжелого бетона призматической прочностью в диапазоне $f_{c15} = 22,2\text{--}65,6$ МПа исследованных серий А, В, С осуществлялось с «мягким» (с постоянной скоростью роста напряжений $V\sigma = d\sigma/dt = \text{const}$) и «жестким» (с постоянной скоростью развития деструкций в бетоне, аналог $V\sigma = d\sigma/dt = \text{const}$) и «жестким» (с постоянной скоростью развития деструкций в бетоне, аналог $V\varepsilon = d\varepsilon/dt = \text{const}$) режимом кратковременного статического нагружения по стандартной [1] методике изложенной в [5–8].

В исследованиях при «мягком» и «жестком» режимах нагружения образцов в качестве максимальных ε_{clx} приняты деформации, соответствующие максимальным напряжениям $\sigma_c = f_c$ в уровне вершины диаграммы $\sigma_c - \varepsilon_{cx}$.

Предельные деформации ε_{culx} контролировались в уровнях $f_c \geq \sigma_c = 0,8 f_c$ нисходящего участка диаграммы $\sigma_c - \varepsilon_{cx}$ при «жестком» режиме нагружения образцов 5, 6 и 7 типоразмера с использованием упругого кондуктора [5–8]. Из полученных экспериментальных данных следует, что относительные максимальные ε_{clx} и предельные ε_{culx} деформации одноосно сжатых серий тяжелого бетона изменяются в диапазоне $\varepsilon_{clx} = (159\text{--}210) \cdot 10^{-5}$ и $\varepsilon_{culx} = (238\text{--}287) \cdot 10^{-5}$, что отвечает опытам других авторов при прочих равных условиях. Выполненные исследования также показывают, что полные максимальные ε_{clx} и предельные ε_{culx} относительные деформации укорочения для испытанных серий тяжелого

бетона убывают с увеличением размеров сечений образцов, т.е. существенно зависят от геометрических размеров бетонных элементов. Характер взаимосвязи ε_{clx} и f_c , а также ε_{clx} и r для исследованных серий тяжелого бетона отражен в [6–9].

Опытные диаграммы зависимости $\sigma_c - \varepsilon_c$ исследованных 7 групп типоразмеров одноосно сжатых образцов с «мягким» режимом нагружения до уровня $\sigma_c = f_c$ и полные диаграммы $\sigma_c - \varepsilon_c$ образцов 5, 6 и 7 групп типоразмеров с «жестким» режимом нагружения предложено [6–10] аппроксимировать аналитическими выражениями (1–3)

$$\varepsilon_{cx} = \varepsilon_{clx} \cdot \left[1 \mp \left(1 - \sigma_c / f_{c(r)} \right)^n \right], \quad (1)$$

σ_c (ε_{cx}) до уровня $\sigma_c = f_c$ при «мягком» режиме нагружения

$$\sigma_c = f_c \cdot \left[1 - \left(1 - \varepsilon_{cx} / \varepsilon_{clx} \right)^{1/n} \right], \quad (2)$$

или в уровнях $(0-1) f_c = \sigma_c \leq f_c \leq \sigma_c = 0,8f_c$ – при «жестком» режиме нагружения

$$\sigma_c = \varepsilon_{clx} \cdot \left[1 \mp \left(1 - \sigma_c / f_{c(r)} \right)^n \right] \cdot \nu_c \cdot E_c, \quad (3)$$

где $n = f_c / E_c \cdot \varepsilon_{clx} = \nu_{cu}$ – предельный коэффициент упругости тяжелого бетона при осевом сжатии ν_{cu} ; $\nu_c \cdot E_c = E_c^{sek}$ – секущий модуль. Знак (–) используется на восходящих участках диаграмм $\sigma_c - \varepsilon_c$, а знак (+) – на нисходящих участках диаграмм $\sigma_c - \varepsilon_c$. Выражениями f_c , ν_{cu} , ν_c , E_c в составе формул (1–3) учитывается влияние таких факторов, как прочность бетона, изменение размеров поперечных сечений, режимов нагружения и др. [6–9].

Опытные и теоретические полные диаграммы зависимости $\sigma_c / f_c - (E_c^{sek}, \nu_c, K_D)$ и графики зависимости $\varepsilon_{cx} - (\varepsilon_{cy}, \theta_c, q_c, \Delta t)$ одноосно сжатого бетона, рассмотренные в [5–8], отражают количественную и качественную оценку процесса развития деструкций и деформирования одноосно сжатого бетона на всех уровнях его нагружения.

Деструкции одноосно сжатого бетона в уровнях $0,5f_c - 0,75f_c < f_c$ полных диаграмм сопровождаются увеличением интенсивности роста псевдопластических деформаций с образованием, раскрытием субмикро-, микротрещин в цементном камне и бетоне. С увеличением нагрузки в уровнях $0,75f_c \leq f_c \leq \sigma_c = 0,8f_c$ интенсивность развития микро- и макротрещин в цементном камне и бетоне возрастает. Формируются участки магистральных трещин, которые в уровнях $f_c \geq \sigma_c = 0,8f_c$ объединяются и в зависимости от прочности бетона разделяют образец на отдельные фрагменты с последующим упруго-вязким (серия бетона А) или хрупким (серии бетона В и С) разрушением.

Использование физико-механических характеристик одноосно сжатого тяжелого бетона, согласно гипотезе одноосности, при сопоставлении внутренних сил (объем эпюры напряжений внецентренно сжатых с $e_o = 1/6 h$ бетонных элементов) с внешним усилием показывает, что в уровнях нагрузки ($0,75 \leq 1 \leq 0,8$) $N_{u,e}$ объемы теоретических эпюр напряжений при «мягких» и «жестких» режимах нагружения на 15–30% менее внешних (показаний пресса). Эти обстоятельства отрицают приемлемость гипотезы одноосности работы волокон неоднородно сжатого бетона и одновременно свидетельствуют о том, что внецентренно нагруженный бетон работает в иных условиях в сравнении с одноосно сжатым.

Данные экспериментальных исследований, выполненные с целью сравнения прочности и деформативности бетона при центральном и внецентренном сжатии, свидетельствуют, что между прочностью f_c однородно сжатого бетона и прочностью $f_{c,e}$ неоднородно сжатого бетона, а также их деформациями (ϵ_{cx} и $\epsilon_{cx,e}$) постоянного соотношения не наблюдается. Величины f_c , $f_{c,e}$ и ϵ_{cx} , $\epsilon_{cx,e}$ изменяются в весьма широком диапазоне и существенно зависят от h , e_o , f_c , режима нагружения и других факторов.

Исследования в этой области продолжаются. Результаты выполненных работ [4–12 и др.] свидетельствуют, что какой бы полной не была информация о поведении одноосно сжатого бетона, она не достаточно адекватно отражает НДС неоднородно нагруженного бетона, характерного для сжатой зоны преобладающего числа несущих конструкций, работающих в условиях внецентренного сжатия или изгиба.

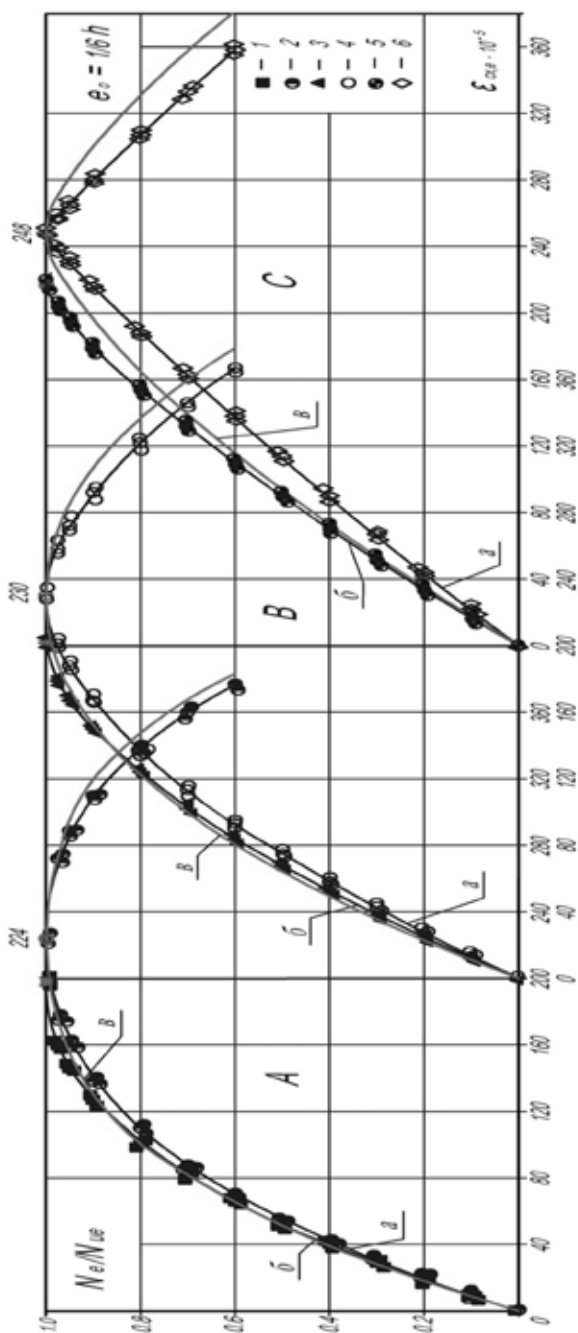


Рисунок 1. Зависимость $\varepsilon_{cx,e}$ от относительной нагрузки N_e/N_{ue} при внецентренном ($\theta_0 = h/6$) сжатии элементов из тяжелого бетона исследованных серий А, В, С прочности при «мягком» и «жестком» режиме кратковременного статического нагружения; 1, 3 и 5 – образцы первой группы типоразмеров, испытанные с «мягким» режимом кратковременного нагружения; 2, 4 и 6 – короткие колонны пятой группы типоразмеров, испытанные с «жестким» режимом кратковременного нагружения;
а – кривые по (8–10) с использованием $\varepsilon_{cx,e}$ и уточнении $V_{cu,e}$ по (11); б – кривые по (8–10) с использованием $\varepsilon_{cx,e}$ и уточнении $V_{cu,e}$ по (11); в-кривые по (8–10) с использованием V_{cu} одноосно сжатых образцов-близнецов

Внецентренное сжатие коротких бетонных колонн вносит существенные изменения в процесс развития деструкций и деформирования неоднородно нагруженного бетона с ростом уровня нагрузки. Характер опытных и теоретических значений зависимости $N_e / N_{ue} - \varepsilon_{cx,e}$ наиболее нагруженных волокон исследованных серий тяжелого бетона приведен на рис. 1.

Нелинейные опытные и теоретические диаграммы зависимости $N_e / N_{ue} - \varepsilon_{cx,e}$ на восходящих и нисходящих участках отражают процессы интенсивности развития деструкций и деформирования неоднородно (с $e_o = 1/6h$) сжатого бетона в зависимости от влияния e_o , h , f_c и режима нагружения.

Отличие интенсивности развития деструкций в структуре внецентренно сжатого бетона в сопоставлении с одноосно сжатым подтверждают опытные и теоретические полные диаграммы зависимости $N_e / N_{ue} - (E_{c,e}^{sek}, \nu_{c,e}, K_{D,e})$ и графики зависимости $\varepsilon_{cx,e} - (\varepsilon_{cy,e}, \theta_{c,e}, q_{c,e}, \Delta t)$ неоднородно сжатого бетона при изменении e_o , h сечения, уровня нагрузки, прочности бетона и режима нагружения [5–8].

Исследования показывают, что поперечные деформации одноосно нагруженного бетона ε_{cy} в 1,85–1,2 раза превышают аналогичные деформации наиболее сжатого волокна $\varepsilon_{cy,e}$ во внецентренно сжатых образцах при равной продольной ε_{cx} . Продольные деформации $\varepsilon_{cx,e}$ крайней сжатой фибры при внецентренном сжатии элементов в 1,2–1,5 раза превышают продольные деформации ε_{cx} одноосно сжатых образцов-близнецов при равной поперечной деформации ε_{cy} .

Следовательно, уменьшение поперечных деформаций внецентренно сжатого бетона является результатом разгружающего влияния соседних менее нагруженных слоев, которые подобно косвенному армированию стесняют развитие поперечных $\varepsilon_{cy,e}$ крайних сжатых фибр, сдерживая их разрушение, способствуют в этих условиях росту продольных $\varepsilon_{cx,e}$. О свойстве включения в работу соседних менее нагруженных слоев бетона при внецентренном сжатии свидетельствуют данные изменения времени прохождения через него импульсов ультразвука, изменения $\theta_{c,e}$ в зависимости от ε_{cx} ; e_o ; f_c , приведенные в [3, 5–10 и др.]. Например, высокие уровни расположения параметрических точек

$f_{сгс,е}^o$, $f_{сгс,е}$ и $f_{сгс,е}^v$; максимальные значения $\theta_{с,е}$; коэффициенты поперечных деформаций $q_{с,е}$; коэффициенты развития деструкций $K_{D,е}$, характеризующие интенсивность развития субмикро- микро- и макротрещинообразований в структуре цементного камня и бетона крайних наиболее сжатых фибр внецентренно нагруженных элементов по отношению к одноосно сжатому бетону при равной продольной $\varepsilon_{сх}$ показывают, что в неоднородно сжатом бетоне развитие трещинообразований происходит со значительной задержкой, чем в одноосно нагруженном. Чтобы повысить уровни параметрических точек ($f_{сгс,е}^o$, $f_{сгс,е}$, $f_{сгс,е}^v$, максимальных значений $\theta_{с,е}$, коэффициента поперечных деформаций $q_{с,е}$) наиболее нагруженных слоев внецентренно сжатого бетона в сравнении с одноосно нагруженным необходимо замедлить в них процесс субмикро- и макротрещинообразования, что осуществляется силовыми связями структуры цементного камня и бетона менее нагруженных фибровых волокон.

Особенности развития деструкций в структуре неоднородно сжатого бетона в сопоставлении с одноосно сжатым подтверждаются данными изменения коэффициента Пуассона ($q_{с,е}$) в зависимости от изменения e_o , h , уровня нагрузки, прочности бетона f_c , исследованных серий прочности и режима нагружения. Из зависимости изменения коэффициента $q_{с,е}$ с увеличением продольных деформаций $\varepsilon_{сх}$ следует, что значения q_c одноосно сжатого бетона с уровня продольных относительных деформаций $\varepsilon_{сх} = 40 \cdot 10^{-5}$ (соответствующего уровню нагрузки $0,3 = N_c / N_{cu}$) на 20–30% больше $q_{с,е}$ наиболее нагруженного волокна при внецентренном сжатии. С увеличением уровня нагрузки до $0,95 = N_c / N_{cu}$ отмеченное превышение увеличивается в 1,75–1,35 раза при продольной деформации $\varepsilon_{сх} = 160 \dots 180 \cdot 10^{-5}$. С увеличением прочности бетона до серии С величина коэффициента $q_{с,е}$ снижается до 1,35.

Характер изменения максимальных $\varepsilon_{сх,е}$ деформаций с увеличением h сечения, эксцентриситета ($e_o = 0 \dots h/6$), прочности бетона f_c и режима нагружения свидетельствует, что между рассматриваемыми величинами ($\varepsilon_{сх,е}$ и h , e_o) наблюдается устойчивая корреляционная связь, которую аппроксимировано выражением (4).

$$\varepsilon_{clx,e} = \varepsilon_{clx}(r) \cdot \gamma_{\varepsilon}, \quad (4)$$

где $\varepsilon_{clx}(r)$ – полные максимальные деформации одноосно сжатого бетона геометрически подобных образцов-близнецов, вычисленные по выражению $\varepsilon_{clx}(r) = f_c(r) / E_c \cdot v_{cu}$ [7...9]; γ_{ε} – коэффициент условий деформирования неоднородно сжатого бетона, зависящий от e_o , h и предельного коэффициента упругости v_{cu} одноосно сжатого тяжелого бетона. Характер изменения коэффициента γ_{ε} исследован на внецентренно сжатых элементах с $e_o/h = 0-1/6$. Зависимость $\gamma_{\varepsilon}(e_o, h, v_{cu})$ для тяжелого бетона имеет вид

$$\gamma_{\varepsilon} = 1 + (e_o/h)^2 \cdot 1/v_{cu} \cdot [338 \cdot (1/4 - e_o/h) - 832 \cdot (1/18 - (e_o/h)^2)]. \quad (5)$$

Опытные значения $\varepsilon_{clx,e}$ хорошо согласуются с вычисленными по формулам (4) и (5). Множественное корреляционное отношение $\tilde{\eta}_0$ связи $\varepsilon_{clx,e}(e_o, h, v_{cu})$ в зависимости (4) равно 0,845. Средняя относительная ошибка (ε) аппроксимации для выражений (4) и (5) составляет 4,45%.

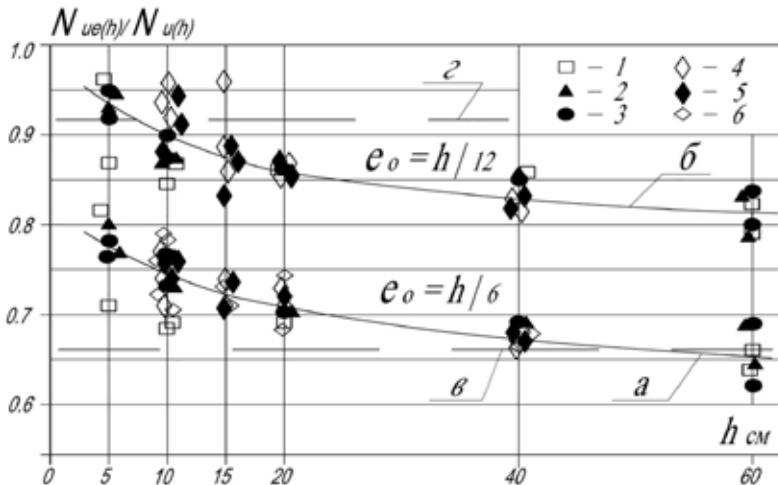


Рисунок 2. Зависимость относительной несущей способности $N_{ue}(h) / N_u(h)$ от h , e_o при внецентренном сжатии бетонных образцов из тяжелого бетона;
 — а; б – кривые по (6); – – в; г по ДБН [2]; 1; 2; 3 – призматические образцы из тяжелого бетона прочностью $f_{c15} = 17,4-62,0$ МПа [12]; 4; 5; 6 – опыты [5, 9, 10]

Относительная несущая способность внецентренно сжатых геометрически подобных образцов-близнецов N_{ue}/N_u также существенно зависит от изменения e_o , h и режима нагружения и изменяется в диапазоне $k_2 = 0,96-0,67$ для $e_o = h/6$ при изменении h от 10–40 см, а при h от 10–60 см $k_2 = 1,06-0,62$, т.е. в 1,7 раза. Действующие Строительные Нормы [39], не учитывающие изменение размеров сечения образцов внецентренно сжатых элементов, рекомендуют принимать при базовой призматической прочности (f_{c15}) $k_2 = 0,666$. Расхождение с рекомендациями [39] весьма существенно, что подтверждает необходимость учета влияния размеров сечений при расчетах внецентренно сжатых бетонных элементов.

Зависимость N_{ue}/N_u от (e_o ; h ; f_c) аппроксимировано частично преобразованным выражением сопротивления упругих материалов (6)

$$N_{ue}(h) = N_u(h) \cdot [\gamma_f / (1 + 6e_o/h)], \quad (6)$$

в котором γ_f – коэффициент условий работы неоднородно сжатого бетона зависит от величин (e_o , h) исследованных серий прочности тяжелого бетона. Характер изменения коэффициента γ_f описан выражением (7)

$$\gamma_f = \left[(84 - 172e_o/h) \cdot e_o/h + \sqrt{h} \right] / \left[(52 - 126e_o/h) \cdot e_o/h + \sqrt{h} \right]. \quad (7)$$

Множественное корреляционное отношение $\tilde{\eta}$, характеризующее тесноту связи нелинейной зависимости $N_{ue}(h)/N_u(r)$ (h , e_o), описанной аналитическим выражением (6), равно 0,876. Средняя относительная ошибка (ϵ) аппроксимации выражений (6) и (7) составляет 4,54%.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ВЫРАЖЕНИЯ ОПИСАНИЯ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ НЕОДНОРОДНО СЖАТОГО БЕТОНА

Исследования о специфике развития деструкций и деформирования внецентренно сжатого бетона свидетельствуют, что действительное напряженно-деформированное состояние сжатой

зоны неоднородно нагруженных бетонных элементов не отвечает расчетному, полученному по полной диаграмме осевого сжатия как при «мягком», так и при «жестком» режиме кратковременного нагружения. Принятие предпосылки об одноосности работы волокон сжатой зоны внецентренно нагруженных бетонных коротких колонн, как правило, не позволяет уравновесить внутренние (объем эпюры) и внешние силы [5–12]. На работу сжатой зоны внецентренно нагруженных бетонных элементов в предельном состоянии оказывают решающее влияние такие факторы, как размеры поперечного сечения (h), эксцентриситеты (e_o) нагрузки, прочность тяжелого бетона и режимы нагружения.

Данные исследований дают основание утверждать, что при неоднородном сжатии связь между напряжениями и деформациями иная, чем при одноосном сжатии. В то же время анализ результатов выполненных исследований и учет единства природы деформирования свидетельствуют, что диаграммы «нагрузка-деформации» внецентренно сжатых бетонных элементов хорошо описываются аналитическими выражениями (8–10), аналогичными связи между $\sigma_c - \varepsilon_{cx}$ осевого сжатия (1–3)

$$\varepsilon_{cx,e} = \varepsilon_{clx,e} \cdot \left[1 \mp 1 \left(1 - N_e / N_{ue} \right)^{v_{cu,e}} \right], \quad (8)$$

до уровня $N_e = N_{ue}$, при «мягком» режиме нагружения

$$N_e = N_{ue} \cdot \left[1 - \left(1 - \varepsilon_{cx,e} / \varepsilon_{clx,e} \right)^{1/v_{cu,e}} \right], \quad (9)$$

или в уровнях (0–1) $N_{ue} \leq N_e \leq N_{ue} = 0,8 N_{ue}$ – при «мягком» или «жестком» режиме нагружения по методике [1], изложенной в [5–8].

$$\sigma_{c,e} = \varepsilon_{clx,e} \cdot \left[1 \mp \left(1 - N_e / N_{ue} \right)^{v_{cu,e}} \right] \cdot v_{c,e} \cdot E_c, \quad (10)$$

где в зависимостях (8–10) $v_{cu,e}$ – предельный коэффициент упругости неоднородно сжатого бетона, который рекомендуется уточнять с использованием максимальных $\varepsilon_{clx,e}$ по формуле (11)

$$v_{cu,e} = \sigma_{cu,e} / \varepsilon_{clx,e} \cdot E_c, \quad (11)$$

в которой $\sigma_{cu, e}$ – напряжения неоднородно сжатого бетона наиболее нагруженной грани, определяются по формулам сопротивления материалов при $e_o = h/6 - \sigma_{cu, e} = 2 \cdot N_{ue} / A_c$, МПа и при $e_o = h/12 - \sigma_{cu, e} = 1,5 \cdot N_{ue} / A_c$, МПа; $\varepsilon_{clx, e}$ – максимальные относительные деформации наиболее нагруженной грани неоднородно сжатого бетона, определяются с учетом влияния h и e_o по формулам (4) и (5); знак (–) используется на восходящем участке диаграммы $N_e / N_{ue} - \varepsilon_{cx, e}$, а знак (+) – на нисходящем участке диаграммы $N_e / N_{ue} - \varepsilon_{cx, e}$. N_{ue} – внецентренно приложенная разрушающая нагрузка, которая определяется по формулам (6) и (7), кН; E_c – начальный модуль упругости одноосно сжатого бетона [8] по формуле $E_c(r) = (74000 \cdot f_{c15}) / (24 + f_{c15})$ МПа; $\nu_{c, e}$ – коэффициент упругости неоднородно сжатого бетона, отражающий процесс нарушения его упруго-пластических свойств с ростом уровня нагрузки на восходящем и нисходящем участках полных диаграмм деформирования, который определяется по формуле (12)

$$\nu_{c, e} = \nu_{cu, e} \cdot (N_e / N_{ue}) / \left[1 \mp \left[1 - (N_e / N_{ue})^{\nu_{cu, e}} \right] \right]. \quad (12)$$

Внецентренное сжатие бетонных образцов привносит отличие в процесс развития деструкций неоднородно сжатого бетона, которое отражается как на мгновенно-упругих, так и на псевдопластических деформациях и, соответственно, на их характеристиках – коэффициентах упругости ($\nu_{c, e}$) и коэффициентах развития деструкций ($K_{D, e}$) в элементах структуры цементного камня и бетона.

Процесс разуплотнения технологически образовавшихся вакансий, дислокаций, субмикро-, микропор внутри кристаллов, а также микропор и микротрещин цементного камня, включая микро- и макротрещин структуры бетона [5–7] до уровня $f_{c, e}^v$ восходящего участка полной диаграммы $\sigma_{c, e} - \varepsilon_{cx, e}$ и диссипативные процессы интенсивного развития микро- и макротрещин в цементном камне и бетоне со слиянием их в фрагменты магистральных трещин и расслоение образца на фрагменты в участке нисходящей ветви полной диаграммы деформирования бетона выражено коэффициентом развития деструкций ($K_{D, e}$).

$K_{D,e}$ определяется в результате преобразования формулы полных деформаций $\varepsilon_{cx,e} / \varepsilon_{cx,e} = \varepsilon_{cx,e}^e / \varepsilon_{cx,e} + \varepsilon_{cx,e}^{pl} / \varepsilon_{cx,e}$, в которой $\varepsilon_{cx,e}^{pl} / \varepsilon_{cx,e} = K_{D,e}$ – параметр, характеризующий интенсивность развития деструкций в структуре неоднородно сжатого бетона. В результате критерий $K_{D,e}$ может быть представлен в

$$K_{D,e} = 1 - \nu_{c,e}, \quad (13)$$

где $\nu_{c,e}$ – коэффициент упругости неоднородно сжатого бетона с увеличением уровня нагружения по (12).

Полные диаграммы зависимости $N_e / N_{ue} - K_{D,e}$ отражают количественную и качественную оценку процесса развития деструкций неоднородно сжатого бетона на всех уровнях его нагружения. Нелинейное развитие деструкций неоднородно сжатого бетона в уровнях $0,75 N_{ue} \leq N_{ue} \leq 0,8 N_{ue}$ сопровождается интенсивным ростом псевдопластических деформаций с образованием микро-, макротрещин, их ростом и слиянием в магистральные трещины с последующим разделением элементов на отдельные фрагменты на нисходящих участках полных диаграмм деформирования внецентренно сжатого бетона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованиями установлено количественное и качественное влияние недостаточно изученных факторов (прочности бетона, его упруго-вязких свойств, абсолютных размеров образцов, эксцентриситета нагрузки, объема сжатой зоны, режима нагружения и др.) на общие закономерности сопротивления тяжелого бетона при центральном и внецентренном сжатии с «мягким» и «жестким» режимом кратковременного нагружения.

Обоснован выбор феноменологической зависимости между напряжениями и деформациями однородно и неоднородно сжатого тяжелого бетона призменной прочностью в диапазоне $f_{c15} = 22,2-65,6$ МПа. Предложено описание аналитическими выражениями зависимостей $\sigma_c - \varepsilon_{cx}$ одноосно (1–3) и $\sigma_{c,e} - \varepsilon_{cx,e}$ внецентренно (8–10) сжатого бетона при «мягком» и «жестком» режиме кратковременного статическом нагружения.

На основании выражений (1–3) и (8–10) предложено [5–11] описание полных диаграмм зависимости $\sigma_c / f_c - (E_c^{sek}, \nu_c, K_D)$ однородно и $N_e / N_{ue} - (E_{c,e}^{sek}, \nu_{c,e}, K_{D,e})$ неоднородно сжатого бетона, отражающих процесс интенсивности развития деструкций на восходящих и нисходящих участках диаграмм, характеризующих процессы накопления и развития псевдопластических деформаций и деформаций быстронатекающей ползучести с ростом уровня нагрузки при «мягком» и «жестком» режиме кратковременного нагружения.

Результаты исследований количественной оценки процесса развития деструкций в структуре бетона с ростом нагрузки, прочности и деформирования центрально и внецентренно сжатых элементов при влиянии значимых факторов повышают надежность прогноза фактической несущей способности неоднородно нагруженных бетонных и железобетонных конструкций и могут быть использованы в качестве сопоставительной оценки при совершенствовании теории деформирования и разрушения неоднородно сжатого бетона.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 24452-80. Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 55 с.
2. ДБН В.2.6.-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення проектування. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. – 96 с.
3. Берг, О. Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона / О. Я. Берг. – М.: Стройиздат, 1962. – 96 с.
4. Карпенко, Н. И. Общие модели механики железобетона / Н. И. Карпенко. – М.: Стройиздат, 1996. – 411 с.
5. Кобринец, В. М. Развитие деструкций внецентренно сжатого бетона на основе полных диаграмм / В. М. Кобринец, В. В. Совгира // Актуальні проблеми інженерної механіки. Тези доповідей IV Міжнародної науково-практичної конференції 16-19 травня 2017 року. – Одеса: Видавництво «Екологія», 2017. – С. 132–136.

6. Мишутин, А. В. Процесс разрушения одноосно сжатого бетона / А. В. Мишутин, В. М. Кобринец, В. В. Совгира // Вісник ОДАБА. – Вип. № 55. – Одеса: ОДАБА, 2014. – С.185–197.
7. Совгира, В. В. Реологическая модель деформирования и разрушения одноосно сжатого бетона на основе полных равновесных диаграмм его упруго-пластических характеристик / В. В. Совгира // Вісник ОДАБА: збірник наукових праць. – Одеса, 2016. – Вип. № 62. – С. 233–239.
8. Совгира, В. В. Полные равновесные диаграммы деформирования одноосно сжатого и растянутого бетона / В. В. Совгира // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. научн. Трудов / Ин-т БелНИИС. – Минск, 2016. – Вып. 8. – С. 270–289.
9. Совгира, В. Н. Об упругопластических характеристиках бетона при одноосном и внецентренном сжатии / В. Н. Совгира, В. В. Совгира // Вісник ОДАБА. – Вип. № 31. – Одеса: ОДАБА, 2008. – С. 269–274.
10. Совгира, В. Н. К вопросу об аналитическом описании диаграммы деформирования бетона / В. Н. Совгира, В. М. Кобринец, В. В. Совгира // Вісник ОДАБА. – Вип. № 32. – Одеса: ОДАБА, 2008. – С. 289–297.
11. Чайка, В. П. Особенности деформирования тяжелого бетона при неоднородном кратковременном сжатии / В. П. Чайка // Бетон и железобетон. – 1987. – № 1. – С. 42–43.
12. Ящук, В. Е. О прочности и деформациях неоднородно сжатого бетона / В. Е. Ящук, В. Н. Совгира // Гидромелиорация и гидротехническое строительство. Респ. межвед. научно-техн. сб. – Ровно, 1989. – Вып. 17. – С. 107–113.
13. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1: General rules and rules for buildings. – European Committee for standardization, 2002. – 226 с.

REFERENCES

1. GOST 24452-80. *Betony. Metody opredeleniya prizmenoy prochnosti, modulya uprugosti i koeffitsienta Puassona*

- [Concretes. Methods for determining the prism strength, elastic modulus and Poisson's ratio]. Moscow: Publishing House of Standards. 1981. 55 p. (rus)
2. DBN V.2.6.-98:2009. Concrete and reinforced concrete structures. The main provisions of the design. Kiev: Ministry of regional development of Ukraine. 2009. 96 p. (ukr)
 3. Berg O. Y. *Fizicheskiye osnovy teorii prochnosti betona i zhelezobetona* [The physical foundations of the theory of concrete and reinforced concrete strength]. Moscow: Construction publishing, 1962. 96 p. (rus)
 4. Karpenko N. I. *Obshchiye modeli mekhaniki zhelezobetona* [General mechanics model of reinforced concrete]. Moscow: Construction publishing, 1996. 411 p. (rus)
 5. Kobrinets V. M., Sovgira V. V. Development of destructions of eccentrically compressed concrete on the basis of complete diagrams. Actual problems of engineering mechanics. Report of the IV International Scientific and Practical Conference May 16-19, 2017. Odessa: Publishing house «Ecology», 2017. pp. 132–136. (rus)
 6. Mishutin A. V., Kobrinets V. M., Sovgira V. V. *Reporter of Odessa State Academy of Construction and Architecture*. Release No.55. Odessa: OSACA. 2014. pp. 185–197. (rus)
 7. Sovgira V.V. *Reporter of Odessa State Academy of Construction and Architecture*: collected research papers. Odessa. 2016. Release No. 62. pp. 233–239. (rus)
 8. Sovgira V. V. *Contemporary issues of concrete and reinforced concrete: collected research papers*. Minsk. 2016. Release 8. pp. 270–289. (rus)
 9. Sovgira V. N., Sovgira V. V. About elastoplastic characteristics of concrete under uniaxial and eccentric compression. *Reporter of OSACA*. Release No. 31. Odessa: OSACA. 2008. pp. 269–274. (rus)
 10. Sovgira V. N., Kobrinets V. M., Sovgira V. V. On the question of analytical description of concrete stress-strain diagram. *Reporter of OSACA*. Release No. 32. Odessa: OSACA. 2008. pp. 289–297. (rus)

11. Chayka V. P. Features heavy concrete with inhomogeneous deformation intermittent compression. *Concrete and reinforced concrete*. 1987. No. 1. pp. 42–43. (rus)
12. Yashcuk V. Y., Sovgira V. N. On the strength and deformation of non-uniformly compressed concrete. *Hydroland and Engineering. Republican interdepartmental scientific and technical collection*. Rovno. 1989. Release No. 17. pp. 107–113. (rus)
13. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1: General rules and rules for buildings. - European Committee for standardization. 2002. 226 p.

Статья поступила в редколлегию 03.09.2017.