

РАЗВИТИЕ ДЕСТРУКЦИЙ В НЕОДНОРОДНО СЖАТОМ БЕТОНЕ ВНЕЦЕНТРЕННО НАГРУЖЕННЫХ КОЛОНН

Совгира В.В., к.т.н.,

ORCID:0000-0002-2990-3823

Мишутин А.В., д.т.н., профессор,

ORCID:0000-0001-9512-6084

Совгира В.Н., к.т.н., доцент,

sovvars@ukr.net, ORCID:0000-0003-4055-8079

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

Аннотация. Исследования упруго-пластических характеристик v_c , E_c^{sek} однородно сжатого тяжелого бетона с учетом влияния значимых факторов и их изменение с увеличением уровня нагрузки при описании зависимости σ_c - ϵ_c и рекомендованные строительными нормами v_{cu} и E_c центрально сжатого бетона количественно и качественно не отражают характер изменения упруго-пластических свойств $v_{cu,e}$ и $E_{c,e}^{sek}$ неоднородно сжатого бетона с ростом уровня нагрузки.

Предложены аналитические выражения зависимости изменения коэффициентов упругости (v_c , $v_{c,e}$), секущих модулей упругости (E_c^{sek} , $E_{c,e}^{sek}$) и коэффициентов интенсивности развития деструкций (K_D , $K_{D,e}$) однородно и неоднородно сжатого бетона с ростом уровня нагрузки при «мягком» и «жестком» режиме нагружения исследованных серий тяжелого бетона с использованием: ϵ_{clx} ; $\epsilon_{clx,e}$; E_c ; $N_{c,e}/N_{cu,e}$; v_{cu} и $v_{cu,e}$, отражающих процесс изменения упруго-пластических свойств бетона на восходящих и нисходящих участках полных диаграмм деформирования бетона и их существенное отличие при центральном и внецентренном сжатии.

Ключевые слова: интенсивность развития деструкций, коэффициент упругости, секущий модуль, режимы нагружения.

Введение. Определение напряженно-деформированного состояния (НДС) изгибаемых, внецентренно нагруженных бетонных и железобетонных конструкций, как правило, сопряжено с уточнением параметров диаграмм деформирования одноосно сжатого бетона и совершенствованием методик трансформирования их на неоднородное напряженное состояние.

Результаты выполненных исследований свидетельствуют, что какой бы полной ни была информация о поведении одноосно сжатого бетона, она адекватно не отражает НДС неоднородно сжатого бетона. Правомерность переноса диаграмм σ_c - ϵ_c однородно сжатого бетона и его упруго-пластических характеристик (v_c , E_c^{sek}) на неоднородно сжатый $\sigma_{c,e}$ - $\epsilon_{c,e}$ (при изгибе и внецентренном нагружении) исследователями оспаривается.

Анализ аналитических выражений рекомендуемых строительными нормами Украины [1] и большинства зарубежных стран, описывающих диаграммы σ_c - ϵ_c центрально сжатого бетона показал, что они прямо или косвенно включают начальный модуль деформаций E_o или секущий модуль деформаций $E_c^{sek}=E_c \cdot v_{cu}$. Где в E_c^{sek} используются значения коэффициента упругости (при $\sigma_c = f_c$), рекомендуемые строительными нормами [1, 2] для тяжелого бетона $v_{cu} = 0,45-0,5$.

Анализ последних исследований. Сопоставление выполненных исследований из литературных источников [3-7 и др.] и обширных экспериментальных результатов авторов [8...13] выявили некоторые отличительные особенности в оценке начального E_o и секущего $E_{c,e}^{sek}$ модуля деформаций неоднородно сжатого тяжелого бетона внецентренно нагруженных и изгибаемых бетонных и железобетонных конструкций и их изменение с ростом уровня нагрузки по сравнению с одноосно сжатым бетоном, вызвавшие противоречивые мнения.

Выполненные исследования свидетельствуют о заметном расхождении в оценке начального модуля деформаций E_o , отражающего изменение упруго-пластических свойств тяжелого бетона. Предлагаемые эмпирические зависимости не полностью отражают влияние

на него таких факторов, как: прочность бетона; зернового состава заполнителей; упругих характеристик заполнителей и цементного камня; количественное содержание цементного камня в составе бетона и условий его твердения; возраста бетона; высоты сечений и величины эксцентриситета; режима нагружения и др.

Вопрос экспериментальных исследований зависимости σ_c - ε_c полных диаграмм деформирования одноосного сжатого (растянутого) бетона и их корректного трансформирования для расчетов внецентренно сжатых (изгибаемых) конструкций с использованием начального модуля деформаций E_o или секущего модуля деформаций $E_{c,e}^{sek}$, отражающих нарушение упруго-пластических свойств (разуплотнения) по высоте сечения неоднородно сжатого бетона с увеличением уровня нагрузки, является актуальным по настоящее время.

Постановка задачи. Исследование интенсивности развития деструкций структуры однородно и неоднородно сжатого тяжелого бетона, его деформирование и разрушение с ростом уровня нагрузки, отражающие изменение упруго-пластических характеристик E_c^{sek} , $E_{c,e}^{sek}$.

Целью работы являются исследования центрально и внецентренно сжатых геометрически подобных бетонных коротких колонн с «мягким» и «жестким» режимом кратковременного статического нагружения при количественном влиянии значимых факторов – на общие закономерности изменения упруго-пластических характеристик E_c^{sek} однородно и $E_{c,e}^{sek}$ неоднородно сжатого бетона при описании полных диаграмм зависимости σ_c - ε_c и $\sigma_{c,e}$ - $\varepsilon_{c,e}$.

Методика исследований интенсивности развития деструкций (разуплотнения) структуры цементного камня и бетона с ростом уровня нагрузки и, следовательно, изменения упруго-пластических характеристик E_c^{sek} однородно и $E_{c,e}^{sek}$ неоднородно сжатого бетона при описании полных диаграмм зависимости σ_c - ε_c и $\sigma_{c,e}$ - $\varepsilon_{c,e}$ при центральном и внецентренном ($e_o = 0 \dots h/6$) сжатии геометрически подобных образцов – коротких колонн предусматривает полное подобие методики испытаний образцов (схем загрузки, условий передачи нагрузки, режимов нагружения и др.) согласно рекомендациям [2].

Исследование напряженно-деформированного состояния одной части центрально и внецентренно сжатых бетонных коротких колонн при «мягком», аналогично испытанию с $d\sigma/dt = const$, режиме нагружения. Вторую часть образцов исследовали при «жестком», подобно испытанию с падающей нагрузкой при $de/dt = const$, режиме нагружений статической ступенчатой нагрузкой на восходящих и нисходящих участках диаграмм по методике, изложенной в [2, 8-13]. Испытания осуществляли, используя сервоуправляемую систему «испытательная машина, пружинный кондуктор – образец, УКБ-1М».

Ультразвуковой метод дефектоскопии при сквозном диагональном прозвучивании дал возможность исследовать, как процесс образования и развития субмикро-, микро- и макротрещин, так и процесс интенсивности развития деструкций (разрывов связей в структуре) однородно и неоднородно сжатого бетона [8-13] с ростом уровня нагрузки.

Изучены закономерности субмикро-, микро- и макроразрушений в однородно и неоднородно сжатом цементном камне, бетоне с реализацией полных диаграмм зависимости σ_c - ε_c и $\sigma_{c,e}$ - $\varepsilon_{c,e}$, отображающих физические процессы интенсивности развития деструкций в структуре бетона и корректно характеризующих изменение упруго-пластических свойств материала с возрастанием уровня нагрузки.

Результаты исследований. Исследованиями [8-13 и др.] определено влияние значимых факторов: прочности бетона; зернового состава заполнителей; упругих характеристик заполнителей и цементного камня; количественного содержания цементного камня в составе бетона и условий его твердения; возраста бетона; высоты сечений и величины эксцентриситета ($e_o = 0 \dots h/6$); режима нагружения и др. на прочность и деформации одноосно и внецентренно сжатого бетона при «мягком» и «жестком» режимах нагружений на восходящих и нисходящих участках диаграмм по методике, изложенной в [2, 8-13].

Учитывая экспериментальные результаты диаграмм σ_c - ε_c исследований центрально сжатых образцов-близнецов с «мягким» и «жестким» режимом нагружения статической

нагрузкой [2] и феноменологические требования к диаграммам σ_c - ε_c (при $\sigma_c \rightarrow 0$, $d\sigma_c/d\varepsilon_c = E_c$ и при $\sigma_c = f_c$, $d\sigma_c/d\varepsilon_c = 0$), предложены [11, с.236, (3-4)] аналитические выражения описания полных диаграмм σ_c - ε_c одноосно сжатых коротких бетонных элементов [11, 12]. В показателе степени выражений (3-4) использована безразмерная характеристика (n) физического смысла которой раскрывается: $n=f_c/E_c \cdot \varepsilon_{cx}=v_{cu}$, где v_{cu} – максимальный коэффициент упругости (при $\sigma_c = f_c$) тяжелого бетона при осевом сжатии. Выражениями f_c , v_{cu} , v_c , E_c в составе формул [11, с.236, (3-4)] учитывается влияние значимых факторов, включая прочность бетона, изменение размеров поперечных сечений, режимов нагружений и др. [10, 11].

В исследованиях со ступенчатым статическим нагружением бетонных образцов – коротких колонн [2] также использован метод ультразвукового анализа, основанный на изменении количественных показателей интенсивности ультразвукового излучения и качественной (визуальной) характеристики – интенсивности мерцания и изменения графика синусоиды на осциллографе УКБ-1М, количественно и качественно отражающих процессы интенсивности развития деструкций (разрывов) в структуре микро- макрообъемах цементного камня и бетона с возрастанием уровня нагрузки.

В процессе испытаний контроль изменения скорости прохождения ультразвукового сигнала при сквозном диагональном расположении пьезокристаллов (излучателей) и приемников прибора УКБ-1М в уровнях $0,5f_c \leq f_c$ при «мягком» режиме и $0,6f_c \leq f_c \leq \sigma_c = 0,6f_c$ – «жестком» режиме нагружения, на осциллографе наблюдался по резким смещениям (всплескам) синусоиды. С увеличением уровня нагрузки частота всплесков увеличивалась. При пятиминутной выдержке нагрузки на ступенях в уровне $0,5 \dots 0,85f_c$ при «мягком» режиме нагружения, в зависимости от прочности тяжелого бетона, всплески прекращались. В уровнях $0,85f_c \leq f_c$ – мерцание синусоиды не прекращалось до разрушения образцов, за исключением уменьшения частоты мерцаний во время выдержек на очередной ступени.

При «жестком» режиме нагружения резкие всплески и затухание во время выдержек синусоиды на осциллографе наблюдались в уровнях $0,6f_c \leq 0,95f_c$. В уровнях нагрузки $0,95f_c \leq f_c \leq \sigma_c = 0,6f_c$ – мерцание синусоиды не прекращалось до лавинообразного разрушения образцов на отдельные фрагменты. В уровнях $0,95f_c \leq f_c \leq \sigma_c = 0,8f_c$, в зависимости от прочности бетона, отмечалось снижение частоты мерцаний во время выдержек на очередной ступени.

Изучение причин проявления различной интенсивности всплесков синусоиды на осциллографе позволило установить, что мерцание синусоиды является реакцией прибора на динамику разрывов силовых связей в структуре субмикро-, микро- и макрообъемов цементного камня и бетона в процессе увеличения нагрузки следующего, более высокого уровня.

Наблюдаемые процессы нарушения структуры цементного камня и бетона объясняются положениями теории А.А. Гвоздева [14] – установившееся поле начальных напряжений, вызванное структурной капиллярно-пористой неоднородностью бетона, взаимодействуя с внутренним полем напряжений от внешней нагрузки, в теле образца формирует местные концентрации напряжений, приводящие при незначительных нагрузках к силовым микроразрывам элементов структуры цементного камня и бетона локального характера с развитием субмикро-, микротрещин в отдельных точках микро- и макрообъема бетона, что подтверждается экспериментально. Следовательно, центрально сжатый бетон в результате начальных микроразрушений при малых напряжениях деформируется по длине образца весьма неравномерно. В процессе увеличения нагрузки очередного уровня $0,5f_c \leq f_c$ при «мягком» и $0,6f_c \leq f_c \leq \sigma_c = 0,6f_c$ – «жестком» режимах нагружения интенсивно изменяющееся вторичное внутреннее поле напряжений в теле образца, вызванное процессом увеличения усилия очередного уровня, взаимодействуя с установившимся полем напряжений предыдущего уровня расширяет объем локальных концентраций напряжений, увеличивая во времени интенсивность динамики силовых микроразрывов элементов структуры цементного камня и бетона локального характера, что подтверждается нелинейностью возрастания псевдопластических деформаций и отражается характерными всплесками разной интенсивности синусоиды осциллографа с увеличением уровня нагрузки и стабилизации всплесков во время выдержек. В уровнях $0,85f_c \leq f_c$ при «мягком» и $0,95f_c \leq f_c \leq \sigma_c = 0,8f_c$ – при «жестком» режимах нагружения с увеличением уровня

нагрузки интенсивность динамики силовых субмикро- и микроразрывов элементов структуры цементного камня и бетона не прекращается, а в уровнях выдержки нагрузки – несколько снижается, что также подтверждается интенсивным ростом деформаций псевдоползучести и псевдопластических деформаций с характерными всплесками синусоиды осциллографа разной интенсивности с ростом микротрещин и прорастанием их в макротрещины, а также в фрагменты магистральных трещин и лавинообразного разрушения.

Выполненные исследования свидетельствуют о том, что механизм деформирования и процесса интенсивности развития деструкций (разуплотнения) структуры цементного камня и бетона с ростом уровня нагрузки связан с нелинейным характером изменения коэффициента упругости ν_c и, следовательно, секущего модуля упругости $E_c^{sek} = E_c \cdot \nu_c$, которые используются при определении жесткости внецентренно сжатых и изгибаемых бетонных и железобетонных конструкций на трещиностойкость и решении других практических и теоретических задач.

В работах [11 и 12] приведены диаграммы зависимости $\sigma_c/f_c - \nu_c$, $\sigma_c/f_c - E_c^{sek}$ одноосно сжатого тяжелого бетона исследованных серий А, В, С образцов призмочной прочностью $f_{c,10} = 23,6; 40,8; 71,0$ МПа. Предложены аналитические выражения [11, с.236...238 (3; 4; 8; 9)] позволяющие выразить характер изменения коэффициента упругости ν_c , отражающего процесс интенсивности развития деструкций (разуплотнения) структуры одноосно сжатого цементного камня и бетона с возрастанием уровня нагрузки на восходящих и нисходящих участках полных диаграмм деформирования бетона, а также определить максимальные (при $\sigma_c=f_c$) значения коэффициентов упругости (ν_{cu}) исследованных серий бетона.

Разуплотнение технологически образовавшихся вакансий, дислокаций микропор внутри кристаллов, а также микропор и трещин цементного камня, включая микро- и макродефекты структуры бетона до уровня f_{cr} на восходящем участке полной диаграммы $\sigma_c - \varepsilon_c$ и диссипативные процессы интенсивного развития микро- и макротрещин в цементном камне и бетоне со слиянием их в фрагменты формирующихся магистральных трещин и расслоение образца на фрагменты с уровня $f_c \geq \sigma_c = 0,8f_c$ нисходящей ветви полной диаграммы деформирования одноосно сжатого бетона, целесообразно отражать коэффициентом интенсивности развития деструкций (K_D).

Аналитическое выражение коэффициента деструкций K_D одноосно сжатого бетона определено в результате преобразования формулы полных деформаций $\varepsilon_c/\varepsilon_c = \varepsilon_c^e/\varepsilon_c + \varepsilon_c^{pl}/\varepsilon_c$. В которой $\varepsilon_c^{pl}/\varepsilon_c = K_D$ – параметр, характеризующий интенсивность развития деструкций в структуре цементного камня и бетона, аналитическое выражение которого представляется в виде:

$$K_D = 1 - \nu_c = 1 - \nu_{cu} \sigma_c / f_c \cdot [1 \mp (1 - \sigma_c / f_c)^{\nu_{cu}}]. \quad (1)$$

Принятие предпосылки об одноосности работы волокон сжатой зоны внецентренно нагруженных ($e_0 = 0 \dots 1/6h$) бетонных колонн и перенос, согласно рекомендаций строительных норм, физико-механических характеристик одноосно сжатого тяжелого бетона на неоднородно сжатый, при сопоставлении внутренних сил (объем эпюры напряжений) с внешним усилием показывает, что в уровнях нагрузки ($0,75 \leq \sigma_c \leq 0,8$) N_{ue} объемы теоретических эпюр напряжений при «мягких» и «жестких» режимах нагружения на 15-30% менее внешних (показаний пресса). Использование гипотезы об одноосности работы неоднородно сжатого бетона, как правило, не позволяет уравновесить внутренние (объем эпюры) и внешние силы [4-12]. На работу неоднородно сжатого бетона внецентренно нагруженных бетонных коротких колонн в предельном состоянии существенное влияние оказывают такие факторы, как прочность тяжелого бетона и режимы нагружения, размеры поперечного сечения и эксцентриситеты нагрузки и др. Эти обстоятельства отрицают преемственность гипотезы одноосности работы волокон неоднородно сжатого бетона и одновременно свидетельствует о том, что внецентренно нагруженный бетон работает в иных условиях при сопоставлении с центрально сжатым.

В то же время анализ результатов выполненных исследований и учет единства природы деформирования тяжелого бетона позволили описать диаграммы $N_e / N_{ue} - \varepsilon_{c,e}$ аналитическими выражениями [13, с.448 (8; 10)], аналогичными связи между $\sigma_c - \varepsilon_c$ осевого сжатия.

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

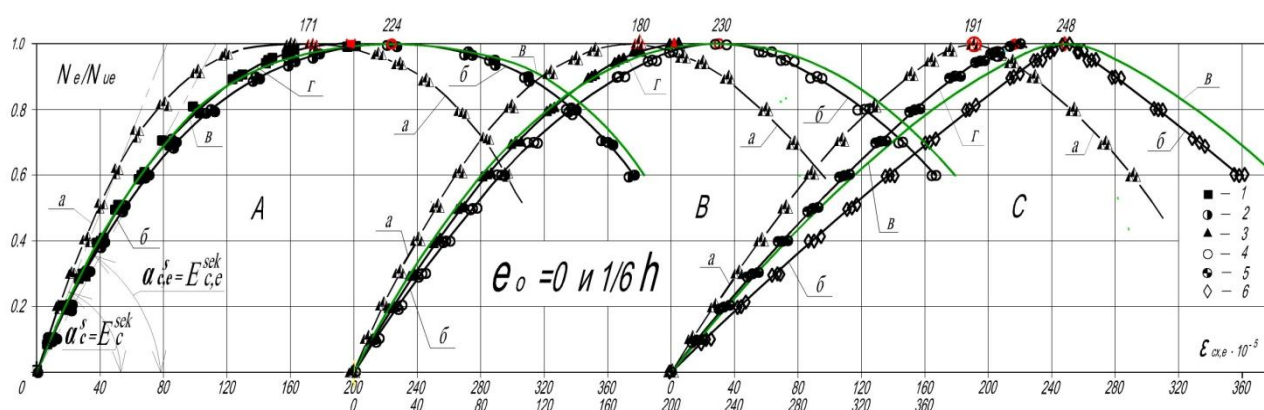


Рис. 1. Сопоставление экспериментальных и теоретических полных диаграмм зависимости $N_e/N_{ue} - \varepsilon_c$ центрально (a) и внецентренно (б ... в) сжатого бетона:

a – опытные и теоретически полные диаграммы однородно сжатого бетона, построенные по выражениям (3...9) [11]; б – опытные и теоретические полные диаграммы наиболее нагруженной фибры неоднородно ($e_o = 1/6h$) сжатого бетона, построенные по выражениям (8...10) [13] с уточнением $v_{cu,e}$ (3); в – полные диаграммы наиболее нагруженной фибры неоднородно ($e_o = 1/6h$) сжатого бетона, построенные с использованием v_{cu} однородно сжатого бетона образцов близнецов

Внецентренное сжатие бетонных коротких колонн привносит отличительные изменения в характер деформирования бетона по высоте сечения. Исследования О.Я. Берга [7] свидетельствуют, что развитие микротрещин в бетоне при наличии градиента напряжений осуществляется в иных условиях, чем при однородном напряженном состоянии. Наши исследования бетонных коротких колонн при внецентренном сжатии показывают, что с увеличением уровня нагрузки их деформирование сопровождается прогрессирующим развитием деструкций, как в сжатом, так и в растянутом бетоне.

Проявление микроразрывов силовых связей структуры бетона наиболее сжатой зоны образцов в процессе их нагружения зафиксировано на разных уровнях нагрузки, зависящих от: вида и f_c бетона; режима нагружения; e_o нагрузки; размеров сечения (h) образцов и, изменяющихся в широком диапазоне – ($0,2N_{ue} \leq N_{ue} \leq 0,85N_{ue}$). Возникающие микроразрывы силовых связей структуры бетона и, как следствие, субмикро- и микротрещины в бетоне крайних наиболее напряженных волокон внецентренно сжатых бетонных элементов стремятся развиваться в глубь бетона, встречая на своем пути менее нагруженные слои бетона с созданным вторичным внутренним полем напряженного состояния, которое препятствует дальнейшему развитию трещин. Кроме того, образовавшиеся субмикро- и микротрещины на своем пути встречают поры, капилляры, дислокации, зерна заполнителей с обходящими трещинами, а также с полем собственного напряженного состояния, которое активно участвует в перераспределении напряжений с устья движущейся микротрещины, препятствуя тем самым ее дальнейшее развитие. С приложением усилия очередной ступени устья трещин прорастают или обходят тормозящие преграды (круглые поры, капилляры, зерна), продолжают развиваться вглубь, встречая новые преграды с вновь созданным полем напряженного состояния с перераспределением возрастающих напряжений на соседние по высоте сечения менее нагруженные волокна, что в конечном итоге приводит к увеличению прочности и деформаций бетона наиболее сжатой зоны образца по отношению к центрально нагруженным.

Описанный процесс трещинообразования в тяжелом бетоне при центральном сжатии и наиболее нагруженного волокна при внецентренном сжатии оценивался косвенными методами на основании характера изменения: поперечных $\varepsilon_{cy}(\varepsilon_{cx})$ и объемных $\theta_c(\varepsilon_{cx})$ деформаций;

коэффициента интенсивности развития деструкций в бетоне $K_D(N_e/N_{ue})$; коэффициента поперечных деформаций $\nu_c(\epsilon_{cx})$ и скорости прохождения ультразвука $\Delta t(\epsilon_{cx})$ с ростом уровня нагрузки по методике, изложенной в [8-12].

Анализ построенных по результатам исследований графиков зависимостей (ϵ_{cy} ; θ_c ; ν_c ; Δt) от ϵ_{cx} и $K_{D,e}$ от N_e/N_{ue} показал, что поперечные деформации ϵ_{cy} центрально сжатого бетона значительно 1,5-1,75 превышают $\epsilon_{cy,e}$ при равной продольной ϵ_{cx} наиболее сжатого волокна во внецентренно сжатых бетонных элементах, а продольные деформации $\epsilon_{cx,e}$ крайней сжатой фибры при внецентренном сжатии в 1,2...1,85 раза превышают ϵ_{cx} центрально сжатых образцов-близнецов при равной поперечной ϵ_{cy} .

На уровень расположения максимальных точек объемных деформаций θ_c центрально и внецентренно сжатого бетона при «мягком» и «жестком» режимах кратковременного нагружения оказывает влияние вид напряженного состояния, величина эксцентриситета нагрузки и прочность тяжелого бетона. Во внецентренно нагруженных образцах точки максимальных θ_c крайних сжатых волокон расположены значительно выше, чем в центрально сжатом бетоне. Наблюдаемое превышение подтверждает гипотезу о существенном влиянии менее нагруженных слоев бетона на развитие поперечных деформаций, вызывающих микроразрушения отрыва в связях структуры бетона крайних сжатых волокон.

Следовательно, интенсивность развития деструкций в структуре цементного камня и неоднородно сжатого бетона с увеличением уровня нагрузки обуславливается особенностями изменения коэффициента упругости, который совместно с начальным модулем упругости ($\nu_c \cdot E_c = E_c^{sek}$) образуют секущий модуль упругости, характеризующий изменение упругопластических свойства бетона и их изменение по высоте сечения на рассматриваемых уровнях нагрузки призматических внецентренно сжатых бетонных коротких колонн.

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 $\nu_{c,e}$ и $K_{D,e}$.

Преобразование аналитических выражений [11, с.237...238 (8; 9)] изменения коэффициента упругости (ν_c) и секущего модуля упругости (E_c^{sek}) с увеличением уровня нагрузки при одноосном сжатии бетона, позволяет описывать диаграммы изменения коэффициента упругости $\nu_{c,e}$ неоднородно сжатого бетона с ростом нагрузки выражением:

$$\nu_{c,e} = \nu_{cu,e} \cdot N_{c,e} / N_{cu,e} : [1 \mp (1 - N_{c,e} / N_{cu,e})^{\nu_{cu,e}}], \quad (2)$$

где $\nu_{cu,e}$ – уточненный (с учетом $\epsilon_{clx,e}$) максимальный коэффициент упругости наиболее нагруженного волокна неоднородно сжатого бетона по формуле:

$$\nu_{cu,e} = \sigma_{cu,e} / \epsilon_{clx,e} \cdot E_c, \quad (3)$$

$N_{c,e} / N_{cu,e}$ – уровень нагрузки. Преобразовав выражения (8; 9) [11], используя гипотезу плоских сечений, получим аналитическое выражение секущего модуля упругости ($E_{c,e}^{sek}$) любого волокна неоднородно сжатого бетона при внецентренном ($e_o = (0..h/6)$) нагружении бетонных колонн:

$$E_{c,e}^{sek} = \sigma_{c,e} / \epsilon_{clx,e} \cdot [1 \mp (1 - N_{c,e} / N_{cu,e})^{\nu_{cu,e}}]. \quad (4)$$

Так как трещинообразованию в одноосно и внецентренно сжатом бетоне предшествует разрыв связей структуры цементного камня и бетона, т.е. разуплотнения материала и, как следствие, увеличение псевдопластических продольных и поперечных деформаций, то целесообразно описывать нелинейный характер процесса разрушения элементов структуры неоднородно сжатого бетона по высоте сечения с ростом уровня нагрузки коэффициентом интенсивности развития деструкций $K_{D,e}$ неоднородно сжатого бетона по формуле:

$$K_{D,e} = 1 - \nu_{c,e}, \quad (5)$$

где $\nu_{c,e}$ – коэффициент упругости волокон неоднородно сжатого бетона по выражению (2).

В исследованиях отмечается изменение по высоте сечения коэффициентов поперечных деформаций $\nu_{c,e}$ фибровых волокон внецентренно сжатых бетонных элементов с ростом уровня нагрузки от 0,15-0,2 $N_{c,e} / N_{cu,e}$, свидетельствующее о том, что коэффициент $\nu_{c,e}$ наиболее сжатой фибры на всех уровнях нагрузки выше 0,2 $N_{c,e} / N_{cu,e}$, существенно (в 1,2- 1,5 раза) меньше $\nu_{c,e}$

фibr менее нагруженной грани (графики 4 на рис. 2). Отмеченное свойство также наблюдается по характеру изменения коэффициента интенсивности развития деструкции $K_{D,e}$ структуры бетона по высоте сечения внецентренно сжатого бетонного элемента (графики 6 на рис. 2), а также скорость прохождения ультразвука $\Delta t(\varepsilon_{cx})$ в неоднородно сжатом бетоне (графики 3 на рис. 2) с ростом уровня нагрузки.

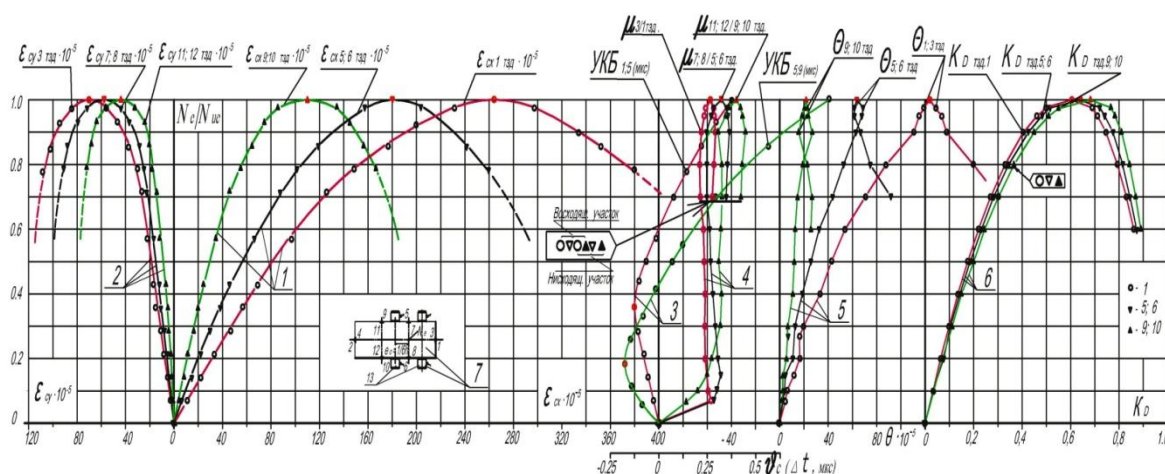


Рис. 2. Графики, характеризующие развитие деструкций в структуре внецентренно сжатого бетона образцов шестой группы типоразмеров из тяжелого бетона серии В с $e_0 = h/6$ при «жестком» режиме нагружения по данным: изменения продольных ε_{cx} и поперечных ε_{cy} деформаций; объемных деформаций θ_c ; скорости (времени) Δt распространения сквозь бетон импульсов ультразвука; изменения коэффициента Пуассона $\nu_{c,e}$ и коэффициента интенсивности развития деструкций $K_{D,e}$ в структуре бетона с ростом уровня нагрузки

Наблюдаемое свойство, обусловлено перераспределением напряжений с наиболее нагруженного фибрового волокна на менее нагруженные силовыми связями на субмикро- и микроуровнях структуры неоднородно сжатого бетона.

Следовательно, исследования напряженно-деформированного состояния бетона внецентренно нагруженных элементов в условиях градиентных эпюр деформаций подтверждают гипотезу о том, что неоднородное линейное сжатие бетонных элементов вызывает в их волокнах сложное напряженное состояние, влияющее на изменение интенсивности развития деструкций в структуре неоднородно сжатого бетона по высоте сечений бетонных и железобетонных элементов.

Выводы. Выполненные исследования позволили установить количественное влияние недостаточно изученных факторов (прочности бетона, его упруго-вязких свойств, размеров сечений (h) образцов, эксцентриситета нагрузки, режима нагружения и др.) на интенсивность развития деструкций в структуре неоднородно сжатого бетона его псевдодеформирования с особенностями изменения коэффициента упругости, который совместно с начальным модулем упругости ($\nu_{c,e} \cdot E_c = E_{c,e}^{sek}$) образует секущий модуль упругости, характеризующий изменение упруго-пластических свойств цементного камня и бетона по высоте сечения.

Предложены выражения (1..5) зависимости изменения коэффициента упругости; секущего модуля упругости и коэффициента интенсивности развития деструкции центрально и внецентренно сжатого бетона с ростом уровня нагрузки при «мягком» и «жестком» режиме нагружения исследованных серий тяжелого бетона с использованием $\varepsilon_{clx,e}$; E_c ; $N_{c,e}/N_{cu,e}$ и $\nu_{c,e}$, отражают процесс интенсивности развития деструкций на восходящих и нисходящих участках полных диаграмм деформирования бетона и его существенное отличие при центральном и внецентренном сжатии.

Практическая оценка изменения коэффициентов упругости (ν_c), интенсивности развития деструкций (K_D) и секущих модулей упругости (E_c^{sek}) однородно и неоднородно сжатого бетона необходима при решении практических и теоретических задач бетона и железобетона.

Литература

1. ДБН В.2.6.-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення проектування. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. – 96 с.
2. ДСТУ Б В.2.7-217:2009 Бетони. Методи визначення призмової міцності, модуля пружності і коефіцієнта Пуассона. – Київ.: Мінрегіонбуд України, 2010. – 16 с.
3. Ганага П.Н. Закономерность изменения секущего модуля деформации в однородных твердых телах / П.Н. Ганага // Известия вузов: Строительство и архитектура, 1988. – №11. – С. 1-5.
4. Бойко В.И. Методы аналитического моделирования процессов разрушения на основе использования полных кривых напряжения-деформация ($\sigma_c-\epsilon_c$) / В.И. Бойко, С.К. Мещанинов, Р.В. Волошин // Сб. научн. трудов ДГТУ. Технические науки, 2012. – Вып. №3. – С. 73-84.
5. Бабич В.И. Исследование модуля деформаций бетона при внецентренном сжатии / В.И. Бабич, Ю.Н. Панчук, С.Р. Жук // Изв. ВУЗов. Строительство и архитектура, 1986. – № 5. – С.11-14.
6. Макаренко Л.П. Практический способ определения модуля упругости и упруго-пластических характеристик бетона при сжатии / Л.П. Макаренко, Г.А. Фенко // Известия вузов: Строительство и архитектура, 1970. – №10. – С.141-147.
7. Берг О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона / О.Я. Берг. – Москва: Стройиздат, 1962. – 96 с.
8. Мишутин А.В. Процесс разрушения одноосно сжатого бетона / А.В. Мишутин, В.М. Кобринец, В.В. Совгира // Вісник ОДАБА. – Одеса: ОДАБА, 2014. – Вип. № 55. – С.185-197.
9. Кобринец В.М. Развитие деструкций внецентренно сжатого бетона на основе полных диаграмм / В.М. Кобринец, В.В. Совгира // Тези доповідей IV Міжнародної науково-практичної конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки». – Одеса. Видавництво. – «Екологія», 2017. – С.132 -136.
10. Совгира В.Н. О упруго-пластических характеристиках бетона при одноосном и внецентренном сжатии / В.Н. Совгира, В.В. Совгира // Вісник ОДАБА. – Одеса: ОДАБА, 2008. – Вип. №31. – С.269-274.
11. 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. – Одеса, 2016. – Вип. № 62. – С.233- 239.
12. 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 Бел НИИС. – Минск, 2016. – Вып.8. – С .270 - 289.
13. Совгира В.В. Полные диаграммы деформирования неоднородно сжатого бетона при внецентренном нагружении коротких бетонных колонн / В.В. Совгира, В.Н. Совгира // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. научн. трудов / Ин-т Бел НИИС. – Минск, 2017. – Вып.9. – С .436 - 454.
14. Гвоздев А.А. Прочность, структурные изменения и деформации бетона / А.А. Гвоздев. – Москва: Стройиздат, 1978. – 299 с.

References

- [1] DBN V.2.6.-98:2009. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii. Osnovni polozhennia proektuvannia. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2009.
- [2] DSTU B V.2.7-217:2009 Betony. Metody vyznachennia pryzmovoy mitsnosti, modulua pruzhnosti i koefitsienta Puassona. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2010.
- [3] P.N. Ganaga, "Zakonomernost izmeneniya sekushchego modulya deformatsii v odnorodnykh tverdykh telakh", *Izvestiya vuzov, Stroitelstvo i arkhitektura*, no. 11, pp.1-5, 1988.
- [4] V.I. Boyko, S.K. Meshchaninov, R.V. Voloshin, "Metody analiticheskogo modelirovaniya protsessov razrusheniya na osnove ispolzovaniya polnykh krivykh napryazheniya- deformatsiya $\sigma_c-\epsilon_c$ ", *Sb. Nauchnykh trudov DGTU, Tekhnicheskie nauki*, Release no. 3, pp. 73-84, 2012.
- [5] V.I. Babich, Yu.N. Panchuk, S.R. Zhuk, "Issledovanie modulya deformatsiy betona pri vnetsentrennom szhatii", *Izvestiya vuzov, Stroitelstvo i arkhitektura*, no.5, pp.11-14, 1986.

- [6] L.P. Makarenko, G.A. Fenko, "Prakticheskiy sposob opredeleniya modulya uprugosti i uprugo-plasticheskikh kharakteristik betona pri szhatii", *Izvestiya vuzov, Stroitelstvo i arkhitektura*, no.10, pp.141-147,1970.
- [7] O.Y. Berg, *Fizicheskiye osnovy teorii prochnosti betona i zhelezobetona*. Moscow: Stroyizdat, 1962.
- [8] A.V. Mishutin, V.M. Kobrinets, V.V. Sovgira, "Protsess razrusheniya odnoosno szhatogo betona", *Visnyk ODABA*, Odesa: ODABA, Vol.55, pp.185-197, 2014.
- [9] V.M. Kobrinets, V.V. Sovgira, "Razvitie destruktivnykh vnesentrenno szhatogo betona na polnykh diagramm", *Aktualni problem inzhenernoi mekhaniky, Tezy dopovidei IV Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii*, Odesa, Vydavnytstvo, «Ekologii», pp.132-136, 2017.
- [10] V.N. Sovgira, V.V. Sovgira, "O uprugo-plasticheskikh kharakteristikakh betona pri odnoosnom i vnesentrennom szhatii", *Visnyk ODABA*, Odesa: ODABA, Vol.31, pp.269-274, 2008.
- [11] V.V. Sovgira, "Reologicheskaya model deformirovaniya i razrusheniya odnoosno zhatogo betona na osnove polnykh ravnovesnykh diagram ego uprugo-plasticheskikh kharakteristik", *Visnyk ODABA: Zb. Naukovykh prats*, Odesa, Vol. 62, pp. 233-239, 2016.
- [12] V.V. Sovgira, "Polnye ravnovesnye diagrammy deformirovaniya odnoosno szhatogo i rastyanutogo betona", *Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona, Sb. Nauchnykh trudov*, In-t BELNIIS, Minsk, Release 8, pp.270-289, 2016.
- [13] V.V. Sovgira, V.N. Sovgira, "Polnye diagrammy deformirovaniya neodnorodno szhatogo betona pri vnesentrennom nagruzenii korotkikh betonnykh kolonn", *Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona, Sb. Nauchnykh trudov*, In-t BELNIIS, Minsk, Release 9, pp.436-454, 2017.
- [14] A.A. Gvozdev, *Prochnost, strukturhye izmeneniya i deformatsii betona*. Moscow: Stroyizdat, 1978.

РОЗВИТОК ДЕСТРУКЦІЙ В НЕОДНОРІДНО СТИСНУТОМУ БЕТОНІ ПОЗАЦЕНТРОВО НАВАНТАЖЕНИХ КОЛОН

Совгира В.В., к.т.н.,

ORCID: 0000-0002-2990-3823

Мішутін А.В., д.т.н., професор,

ORCID:0000-0001-9512-6084

Совгира В.М., к.т.н., доцент,

sovvars@ukr.net, ORCID:0000-0003-4055-8079

Одеська державна академія будівництва і архітектури

Анотація. Дослідження пружно-пластичних характеристик v_c , E_c^{sek} однорідно стиснутого важкого бетону із врахуванням значущих факторів та їх зміну із зростанням рівня навантаження при опису залежності σ_c - ϵ_{cx} і рекомендовані будівельними нормами v_{cu} і E_c одновісно стиснутого бетону кількісно і якісно не відображають характер зміни пружно-пластичних властивостей $v_{cu,e}$ і $E_{c,e}^{sek}$ неоднорідно стиснутого бетону із зростанням рівня навантаження.

Запропоновано аналітичні вирази залежності зміни коефіцієнтів пружності (v_c , $v_{c,e}$), січних модулів пружності (E_c^{sek} , $E_{c,e}^{sek}$) і коефіцієнтів інтенсивності розвитку деструкцій (K_D , $K_{D,e}$) однорідно і неоднорідно стиснутого бетону із зростанням рівня навантаження при «м'якому» і «жорсткому» режимі навантаження досліджених серій важкого бетону з використанням: ϵ_{cx} ; $\epsilon_{cx,e}$; E_c ; $N_{c,e}/N_{cu,e}$; v_{cu} і $v_{cu,e}$, які відображають процес зміни пружно-пластичних властивостей бетону на висхідних і низхідних ділянках повних діаграм деформування бетону і їх суттєва відмінність при центральному та позацентровому стиску.

Дослідженнями відзначено, що інтенсивність розвитку деструкцій у структурі неоднорідно навантаженого бетону суттєво нижче, ніж в одновісно стиснутому.

Експериментально визначено характерну зміну по висоті перерізу позацентрово-стиснутих бетонних елементів коефіцієнта поперечних деформацій $v_{c,e}$, яка свідчить про те, що із зростанням рівня навантаження, коефіцієнт $v_{c,e}$ найбільш стиснутої фібри на всіх рівнях навантаження, значно (в 1,2-1,5 рази) менше $v_{c,e}$ волокон, менш навантажених фібр.

Відзначена властивість, обумовлена зміною внутрішнього напруженого стану із зростанням навантаження і перерозподілом напружень силовими зв'язками структури неоднорідно стиснутого бетону із субмікро- і мікрорівнів волокон найбільш навантаженої грані по висоті перерізу позацинтро-стиснутих елементів на менш навантажені волокна. Процес перерозподілу напружень по висоті перерізу бетонних колон, як властивість, проявляється на зміні поперечної деформації $\varepsilon_{cy,e}$ і, як наслідок, зміні коефіцієнта поперечної деформації $\nu_{c,e}$, який впливає на напружений стан стиснутої зони подібно внутрішнім силовим зв'язкам, забезпечуючи суттєве підвищення максимальних напружень і деформацій в неоднорідно стиснутому бетоні.

Ключові слова: інтенсивність розвитку деструкцій, коефіцієнт пружності, січний модуль, режими навантаження.

DEVELOPMENT OF DESTRUCTIONS IN HETEROGENEOUSLY COMPRESSED CONCRETE OF ECCENTRICALLY LOADED COLUMNS

Sovgyra V.V., PhD.,

ORCID: 0000-0002-2990-3823

Mishutin A.V., Doctor of Engineering, Professor,

ORCID:0000-0001-9512-6084

Sovgyra V.N., PhD., Assistant Professor,

sovvars@ukr.net, ORCID:0000-0003-4055-8079

Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. Studies of the elastic-plastic characteristics of ν_c , E_c^{sek} of homogeneously compressed heavy concrete taking into account the influence of significant factors and their change with increasing load when describing the dependence σ_c - ε_{cx} and recommended by the Building Standards $\nu_{cн}$ and E_c of uniaxially compressed concrete do not quantitatively and qualitatively reflect the nature of the change in elastic-plastic properties of $\nu_{cu,e}$ and $E_{c,e}^{sek}$ of heterogeneously compressed concrete with increasing load level.

Analytical expressions are proposed for the dependence of changes in the elastic coefficients (ν_c , $\nu_{c,e}$), secant modulus of elasticity (E_c^{sek} , $E_{c,e}^{sek}$) and the coefficients of the intensity of the development of destructions (K_D , $K_{D,e}$) of homogeneously and heterogeneously compressed concrete with an increase in the load level with «soft» and the «hard» loading mode of the investigated series of heavy concrete using: ε_{clx} ; $\varepsilon_{clx,e}$; E_c ; $N_{c,e}/N_{cu,e}$; ν_{cu} and $\nu_{cu,e}$, reflecting the process of changing the elastic-plastic properties of concrete in the ascending and descending sections of the complete diagrams of concrete deformation and their significant difference under central and eccentric compression.

Studies have noted that the intensity of the development of destruction in the structure of heterogeneously loaded concrete is significantly lower than in uniaxially compressed. The experiments established a characteristic change in the cross-sectional height of eccentrically compressed concrete elements of the transverse strain coefficient $\nu_{c,e}$, indicating that with an increase in the load level, the coefficient $\nu_{c,e}$ of the most compressed fiber at all load levels is significantly (1,2-1,5 times) less than $\nu_{c,e}$ fibers, less than loaded fibers.

The noted property is due to a change in the internal stress state with increasing load and the redistribution of stresses by force bonds of the structure of heterogeneously compressed concrete from the submicro and micro levels of the fibers of the most loaded face along the section height of eccentrically compressed elements to less loaded fibers. This process of stress redistribution along the height of the cross section of concrete columns as a property manifests itself in a change in the transverse strain $\varepsilon_{cy,e}$ and, as a consequence, a change in the transverse strain coefficient $\nu_{c,e}$, which affects the stress state of the compressed zone like internal force bonds, which provide a significant increase in maximum stresses and strains in heterogeneously compressed concrete.

Keywords: the intensity of the development of destruction, coefficient of elasticity, secant modulus, loading modes.

Стаття надійшла 7.10.2019