

**РЕОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ
ОДНООСНО СЖАТОГО БЕТОНА НА ОСНОВЕ ПОЛНЫХ РАВНОВЕСНЫХ
ДИАГРАММ ЕГО УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

Совгира В.В.

*Одесская государственная академия строительства и архитектуры
sovvars@ukr.net*

Аннотация. Приведены результаты исследований равновесного деформирования и разрушения одноосно сжатого тяжелого бетона (ТБ), полученные с использованием испытательных машин, обеспечивающих "жесткое" нагружение. Выполнен анализ упруго-пластических свойств сжатого бетона и их изменение с ростом нагрузки. Предложены полные равновесные диаграммы изменения упруго-пластических свойств однородно сжатого бетона и развития деструкций с их аналитическими выражениями.

Ключевые слова: вакансии, дислокации, микро-макропоры, деструкции, разрушение, деформирование, равновесные диаграммы, упруго-пластические характеристики, тяжелый бетон.

**РЕОЛОГІЧНА МОДЕЛЬ ДЕФОРМУВАННЯ ТА РУЙНУВАННЯ
ОДНОВІСНО СТИСНУТОГО БЕТОНУ НА ПІДСТАВІ ПОВНИХ
РІВНОВАЖНИХ ДІАГРАМ ЙОГО ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНИХ
ХАРАКТЕРИСТИК**

Совгира В.В.

*Одеська державна академія будівництва та архітектури
sovvars@ukr.net*

Анотація. Приведені результати досліджень рівноважного деформування та руйнування одновісно стиснутого важкого бетону, одержані з використанням випробувальних машин, забезпечуючих "жорстке" навантаження. Виконано аналіз його пружно-пластичних властивостей та їх зміну із зростанням навантаження. Запропоновані повні рівноважні діаграми зміни пружно-пластичних властивостей однорідно стиснутого бетону та розвиток деструкцій з їх аналітичними виразами.

Ключові слова: вакансії, дислокації, мікро-макропори, деструкції, руйнування, деформування, рівноважні діаграми, пружно-пластичні характеристики, важкий бетон.

**RHEOLOGICAL MODEL OF DEFORMATION AND FRACTURE OF UNIAXIAL
COMPRESSION OF CONCRETE ON THE BASIS OF POLAR DIAGRAMS OF THE
EQUILIBRIUM OF ITS ELASTIC-PLASTIC CHARACTERISTICS**

Sovgyra V.V.

*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture
sovvars@ukr.net*

Abstract. The results of studies of the equilibrium of deformation and fracture of uniaxial compression heavy concrete produced using test machines, providing "hard" loading. The analysis of elastic-plastic properties of compressed concrete and changing them with increasing load.

It offers a complete equilibrium diagram uniaxial compression deformation of heavy concrete

and change the equilibrium diagram of elastic-plastic properties (secant modulus of elasticity, coefficient of elasticity, destruction test) and destructions of uniformly compressed concrete with their analytical expressions. Changing the secant modulus of elasticity, and strain rate uniaxial compression of concrete with load growth, characterized by the accumulation of processes and development of plastic pseudodeformations.

Keywords: vacancies, dislocations, micro-macro-pores, degradation, destruction, deformation, equilibrium diagram, the elastic-plastic characteristics, heavy concrete.

Введение. Надежная, длительная и безопасная эксплуатация зданий и сооружений из бетонных и железобетонных конструкций в условиях влияния различных факторов обеспечивается обоснованными решениями систем аналитических выражений, с использованием физико-механических характеристик материалов нормированных при одноосном сжатии и растяжении. Однако структура бетона, включающая твердую фазу, поровое пространство и микротрещины с его реологическими свойствами неоднородна и ее изменение при заданной прочности на сжатие влияет на деформативность, трещиностойкость, упруго-пластичность и другие свойства, которые учесть в явном виде при аналитическом описании экспериментальных диаграмм сжатия бетона, даже с использованием эмпирических выражений, сложно. А вопрос о возможности непосредственного применения диаграмм одноосного сжатия бетона или их корректной трансформации для расчетов неоднородно сжатых конструкций является актуальным по настоящее время.

Цель и задачи работы. Экспериментальное получение корректных параметров полных равновесных диаграмм деформирования ТБ одноосно сжатых коротких бетонных колонн и описание их аналитическими выражениями, отражающими феноменологические закономерности его деформирования, а также изменение упруго-пластических свойств бетона с ростом нагрузки.

Объекты и методы исследований. Исследуется напряженно-деформированное состояние одноосно сжатых коротких бетонных колонн, процесс их деформирования и разрушения с ростом кратковременной нагрузки. Методика экспериментальных исследований детально изложена в работах [8, 10...12].

Закономерности нано- микро- и макроразрушений в центрально сжатом бетоне и цементном камне [8] с реализацией полных равновесных диаграмм деформирования автором осуществлялось с использованием критериев [3] отражающих: характер изменения поперечных (ϵ_{cy}), продольных (ϵ_{cx}) и объемных (θ_c) деформаций, коэффициента Пуассона (ν), времени прохождения ультразвука (Δt ; f_{crc}^o ; f_{crc}^v) на различных уровнях механических испытаний призм (100 x 100 x 400 мм) в возрасте 180 дней из тяжелого и мелкозернистого бетона [8, 10...12] призмной прочностью $f_{cm,10} = 19,2; 39,7; 64,4$ МПа.

Экспериментальные исследования показывают, что развитие деформаций бетона с ростом нагрузки и форма диаграммы $\sigma_c - \epsilon_c$ зависит от скорости подачи напряжений $v_\sigma = d\sigma/dt = const$ при так называемом "мягком" нагружении. Достижение напряжений $\sigma_c = f_c$ с соответствующей деформацией ϵ_{cl} приводит к быстрому исчерпанию несущей способности и невозможности зафиксировать нисходящий участок кривой $\sigma_c - \epsilon_c$.

При "жестком" нагружении образцов с обеспечением постоянной скорости деформирования $v_\epsilon = d\epsilon/dt = const$ после достижения максимального напряжения $\sigma_c = f_c$ которому соответствует деформация ϵ_{cl} наблюдается нисходящий участок диаграммы $\sigma_c - \epsilon_c$. Дальнейший рост деформаций сопровождается падением величины напряжений $f_c > \sigma_c$, которому соответствует предельная деформация $\epsilon_{cul} > \epsilon_{cl}$. Чтобы обеспечить постоянную скорость деформирования $v_\epsilon = d\epsilon/dt = const$ исследователи разрабатывают дополнительное оборудование к имеющимся испытательным машинам. По вопросу качества этого оборудования и возможности с его помощью корректного обеспечения контроля и реализации постоянной скорости деформирования $v_\epsilon = d\epsilon/dt = const$, исследователи выражают противоречивые мнения.

Методика определения физико-механических характеристик бетона [1] не учитывает влияния упругой энергии, накапливаемой в "системе испытательная машина - образец". Равновесный характер деформирования и разрушения бетонного образца рекомендовано [6] выразить формулой:

$$GA \geq Q_0 + Q_M, \quad (1)$$

где Q_0 , Q_M , – потенциальная упругая энергия, накапливаемая соответственно в образце, и испытательной машине; G – энергия разрушения бетонного образца; A – площадь поперечного сечения образца. При не соблюдении условия (1) избыточная потенциальная энергия в системе "испытательная машина - образец" превращаясь в кинетическую энергию вызывает лавинообразное разрушение [8].

Чтобы создать условия стабильного и равновесного характера деформирования и разрушения бетонного образца с учетом накапливаемой потенциальной энергии в системе "испытательная машина - образец" необходимо предусмотреть перераспределение с образца часть потенциальной энергии с помощью специального механизма, что отражено в откорректированном выражении (2)

$$GA \geq (Q_K + Q_0) + Q_M, \quad (2)$$

где Q_K – потенциальная упругая энергия, воспринимаемая кондуктором мощностью $Q_K \geq 2 \dots 4Q_0 = 2 \dots 4 \cdot (G \cdot A)$ в зависимости от прочности бетона.

Для обеспечения равновесного деформирования и разрушения бетонных образцов, автором разработан и реализован упругий кондуктор (по принципу пружинного динамометра), устанавливаемый в стандартную испытательную машину ПСУ-250, который нейтрализует часть накапливаемой потенциальной энергии, не снижая жесткости системы "испытательная машина - образец" и способствует перераспределению нагрузки, подаваемой машиной, между плитами кондуктора и образцом. Образцы испытывали кратковременной статической нагрузкой до разрушения с помощью кондуктора и без кондуктора, используя индивидуальную оснастку крепления приборов (индикаторов часового типа, ультразвуковых щупов) и тензодатчиков на поверхности образцов и кондукторе. Давление на образец передавалось через жесткие металлические плиты кондуктора с ножевыми шарнирами по методике [1] путем постепенного (ступенями) нагружения призм осевой сжимающей нагрузкой с 5-минутной выдержкой на каждой ступени. Величину нагрузки на каждой ступени принимали примерно $0,1f_{cm}$, в уровнях до $0,2f_{cm}$ и после $0,75f_{cm}$ до $0,9f_{cm}$ ее уменьшали вдвое, а в уровнях от $0,9f_{cm} \leq f_{cm} \leq 0,7f_{cm}$ нагрузку принимали $0,025f_{cm}$ и $0,0125f_{cm}$.

Результаты выполненных работ [3...14] свидетельствуют, что какой бы полной ни была информация о поведении одноосно сжатого бетона она не достаточно адекватно отражает НДС неоднородно сжатого бетона. Правомерность переноса диаграммы зависимости $\sigma_c - \varepsilon_c$ одноосно сжатого бетона на неоднородно сжатый исследователями оспаривается.

Учитывая важность установления надежной связи между $\sigma_{c,e}$ и $\varepsilon_{c,e}$ бетона проведены исследования сопротивления центральному и внецентренному сжатию 288 масштабных подобных коротких колонн из обычного тяжелого бетона призматической прочностью $f_{cm,15} = 18.5; 38.2; 62.0$ МПа и, с целью исключения влияния неоднородности материала образцов, из мелкозернистого бетона широкого диапазона прочностей по методике, изложенной в работах [8, 10...12].

Анализ имеющихся в литературе экспериментальных данных [3...14 и др.] и результаты опытов авторов [8, 10...12] позволили обнаружить ряд принципиальных особенностей, характеризующих упруго-пластические свойства бетона в процессе его деформирования и разрушения при кратковременном одноосном сжатии.

Описание диаграмм сжатия бетона в аналитической форме, учитывающей разнообразие влияющих факторов – возраста, вида, состава и прочности бетона; режима нагружения - кратковременного (при постоянной скорости подачи напряжений $v_\sigma = d\sigma/dt = const$ или при постоянной скорости деформирования $v_\varepsilon = d\varepsilon/dt = const$) и

длительного; эксцентриситета приложения нагрузки; высоты сечения образцов и др., сопряжено с известными трудностями.

Рассмотренные в работах [3...14 и др.] аналитические зависимости $\sigma_c - \varepsilon_c$ деформирования бетона дают более или менее хорошее совпадение с опытом. Однако при описании ниспадающего участка кривой используются ряд многочленов не всегда отражающих физические свойства и состояние однородно сжатого бетона, а аппроксимирующие функции не удовлетворяют некоторым феноменологическим закономерностям его деформирования.

Результаты исследований. Обобщая результаты экспериментов о деформировании одноосно сжатого тяжелого бетона (ТБ) и данные литературных источников авторы [14], учитывая феноменологические требования к зависимости $\sigma_c - \varepsilon_c$ (при $\sigma_c \rightarrow 0, d\sigma_c / d\varepsilon_c = E_{cm}$) и при $\sigma_c = f_{cm}, d\sigma_c / d\varepsilon_c = 0$), предложили выражения, описывающие восходящую ветвь диаграммы $\sigma_c - \varepsilon_c$. Преобразовав предложенные [14] выражения, получено аналитическое описание полных равновесных диаграмм деформирования одноосно сжатого бетона при кратковременном действии нагрузки в виде

$$\sigma_c(r) = f_{cm}(r) [1 \mp [1 - \varepsilon_c(r) / \varepsilon_{cl}(r)] / v_{cu}]^{1/v_{cu}}, \quad (3)$$

$$\varepsilon_{cl}(r) = \varepsilon_{cl}(r) [1 \mp [1 - \sigma_c(r) / f_{cm}(r)]^{v_{cu}}], \quad (4)$$

где $\varepsilon_{cl}(r)$ - предельные продольные относительные деформации, зависящие от прочности одноосно сжатого ТБ (f_c) и размеров сечения призматических образцов - условного радиуса сечения (r), равного отношению площади сечения образца к его периметру. Знак (-) используется на восходящем участке диаграммы $\sigma_c - \varepsilon_c$, а знак (+) - на ниспадающем участке диаграммы $\sigma_c - \varepsilon_c$.

Зависимость $\varepsilon_{cl} f(f_{cm}(r))$ для кратковременного сжатия в работах [11, 12] аппроксимирована выражением $\varepsilon_{cl}(r) = f_{cm}(r) / (E_{cm} \cdot v_{cu})$, в котором $f_{cm}(r)$ - временное сопротивление осевому сжатию призматических образцов из ТБ с учетом влияния масштабного эффекта в [11, 12] аппроксимировано выражением - $f_{cm}(r) = f_{cm15} (4,25 + r) / (3,5 + 1,2 r)$, где f_{cm15} - временное сопротивление сжатию стандартных базовых призм сечением 150 x 150 мм, МПа; E_{cm} - начальный модуль упругости при осевом сжатии (в МПа), который зависит от прочности ТБ и аппроксимирован [11, 12] выражением, $E_{cm} = (74000 \cdot f_{cm15}) / (24 + f_{cm15})$; v_{cu} - уточненный в [9, 10] предельный коэффициент упругости центрально сжатых базовых призм из ТБ - $v_{cu} = (19 + f_{cm15}) / (102 + 0,4 f_{cm15})$.

На рис.1 показаны опытные и теоретические диаграммы $\sigma_c - \varepsilon_c$ одноосно сжатого ТБ,

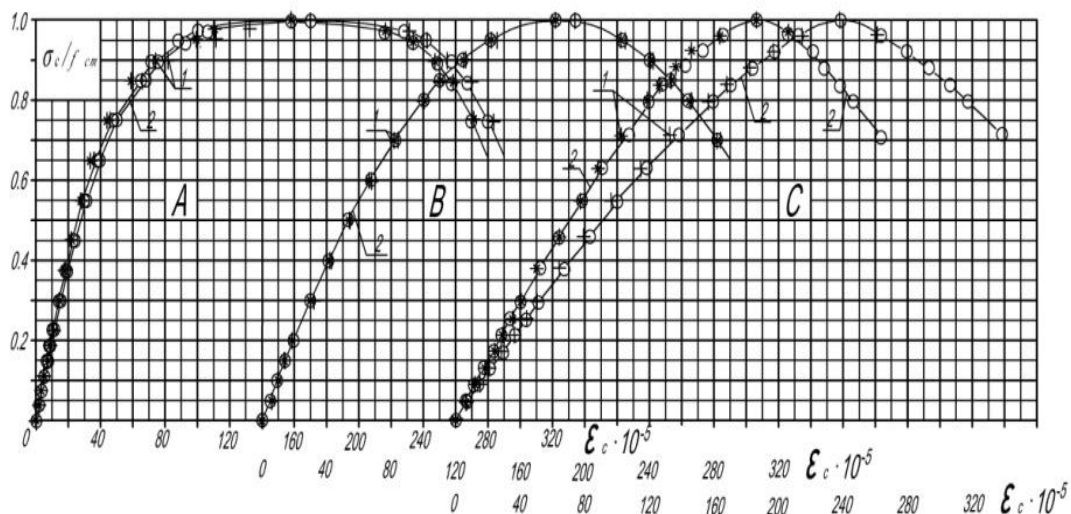


Рис.1. Диаграммы $\eta - \varepsilon_c$ одноосно сжатого бетона: 1- опытные значения образцов серий А; В и С прочностью, соответственно, $f_{cm10} = 19,2; 39,7; 64,4$ МПа, сечением 10x10 см; 2 - кривые по выражению (3)

аппроксимированные функцией (3) с использованием опытных ε_{cl} .

Анализ экспериментальных и теоретических значений σ_c показывает, что они близки, а во многих случаях совпадают.

Начальный модуль упругости (E_{cm}) равен тангенсу угла наклона касательной к кривой $\sigma_c - \varepsilon_c$ в начале координат (при $\sigma_c \rightarrow 0$ и $\varepsilon_c \rightarrow 0$), являющейся также предельным положением для секущей к этой кривой, то :

$$E_{cm} = \operatorname{tg} \alpha_0 = \lim_{\sigma \rightarrow 0} \sigma_c / \varepsilon_c = \lim_{\sigma \rightarrow 0} \operatorname{tg} \alpha^k = \lim_{\sigma \rightarrow 0} E_c^k = E_{cm} [1 - \sigma_c / f_{cm}]^{1 - \nu_{cu}} = \lim_{\sigma \rightarrow 0} \operatorname{tg} \alpha^s = \lim_{\sigma \rightarrow 0} E_c^{sek}, \quad (5)$$

где E_{cm} и E_c^k – начальный и касательный модуль упругости, углы α_0 и α^k устанавливаются по опытной кривой $\sigma_c - \varepsilon_c$, описанной аналитическим выражением (3).

Из зависимости (5) следует, что наибольшее приближение секущего модуля упругости (E_c^{sek}) к касательному (E_c^k) или начальному (E_{cm}) возможно при малых величинах напряжений $\sigma_c = 0,05 \dots 0,3 f_{cm}$ при которых по восходящей кривой $\sigma_c - \varepsilon_c$ (рис.2), согласно рекомендациям [1] определяются их значения.

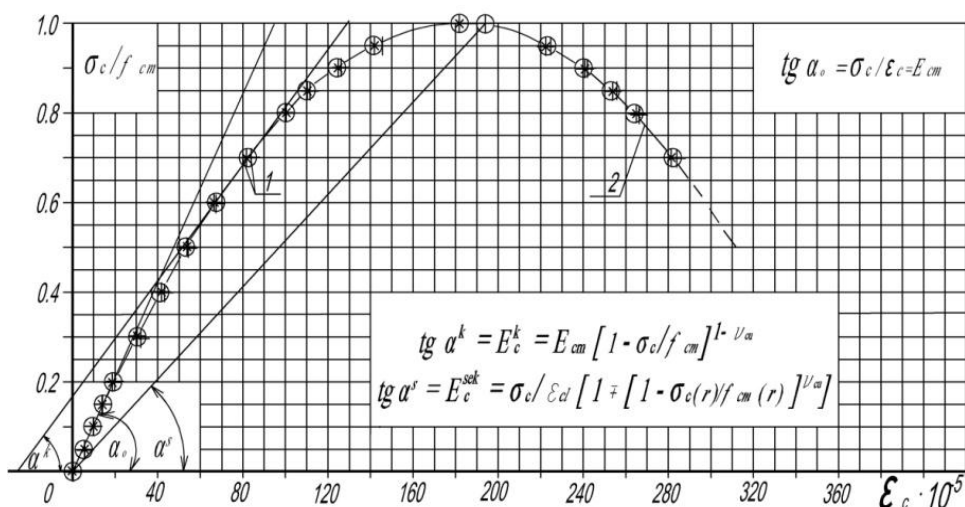


Рис. 2. Начальный E_{cm} , касательный E_c^k и секущий E_c^{sek} модули деформаций бетона при кратковременном сжатии образцов до разрушения по результатам опытов [11...12]; 1 – диаграмма деформирования одноосно сжатого бетонного образца сечением 100 x 100 мм с начальным E_{cm} , касательным E_c^k и секущим E_c^{sek} модулем упругости; 2 – опытные значения бетонных образцов серии В прочностью, $f_{cm10} = 39,7$ МПа из рис.1

Допуская, что бетон на этом участке кривой $\sigma_c - \varepsilon_c$ подчиняется линейному закону, зависимость между напряжениями и деформациями выражена в виде

$$\sigma_c = \varepsilon_c^l \cdot E_{cm} \quad (6)$$

то, учитывая (3, 4 и 5) получим

$$\sigma_c = \varepsilon_c \cdot E_c^{sek} = \varepsilon_c^l \cdot E_{cm}, \quad (7)$$

а подставляя в условие (7) значения ε_c^l из (6) и значение ε_c из (4) дает возможность установить выражение, характеризующее изменение секущего модуля E_c^{sek} по восходящей кривой $\sigma_c - \varepsilon_c$ до достижения $\sigma_c = f_{cm}$ и $\varepsilon_c = \varepsilon_{cl}$ и нисходящей кривой в уровнях $0,7 f_{cm} \leq f_{cm}$ и $\varepsilon_c \leq \varepsilon_{cl} \leq \varepsilon_{cul}$

$$E_c^{sek} = \sigma_c / \varepsilon_{cl} [1 \mp [1 - \sigma_c(r) / f_{cm}(r)]^{\nu_{cu}}], \quad (8)$$

где ν_{cu} – предельный коэффициент упругости центрально сжатого бетона; знак (-) используется на восходящем участке кривой $\sigma_c - \varepsilon_c$, а знак (+) – на нисходящем участке.

На рис. 3 приведены графики изменения секущего модуля E_c^{sek} с ростом нагрузки для исследованных прочностей бетона.

Зависимости (3, 4, 5 и 8) позволяют выразить характер изменения коэффициента упругости ν_c , отражающего процесс нарушения упруго-пластических свойств структуры одноосно сжатого бетона с ростом нагрузки на восходящем и нисходящем участке равновесной диаграммы деформирования бетона преобразуя выражение $\nu_c = \varepsilon^I / \varepsilon_c$ получим

$$\nu_c = \frac{\nu_{cu} \cdot \sigma_c(r)}{f_{cm}(r)} \cdot \left[1 \mp \left[1 - \sigma_c(r) / f_{cm}(r) \right]^{\nu_{cu}} \right]. \quad (9)$$

На рис. 3 также приведены графики изменения коэффициента упругости ν_c с ростом нагрузки, отражающие процесс разуплотнения технологически образовавшихся вакансий, дислокаций нано- микропор внутри кристаллов, а также микропор и трещин цементного камня, включая микро- и макродефекты структуры бетона [6] до уровня f_{cr}^v восходящих участков равновесных диаграмм $\sigma_c - \varepsilon_c$ 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 на нисходящей ветви равновесной диаграммы деформирования бетона, которые характеризуются коэффициентом деструкций K_D бетона.

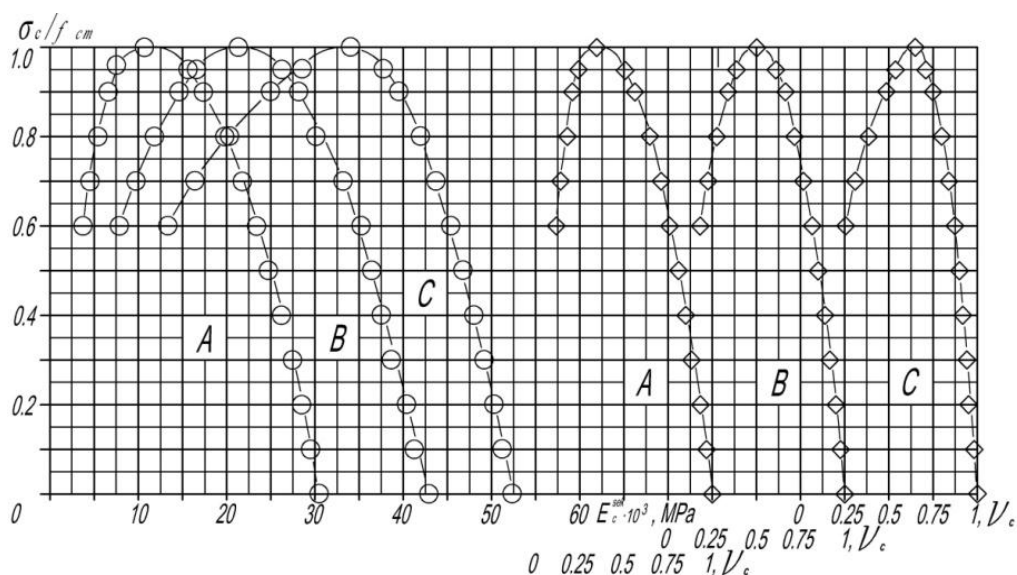


Рис. 3. Изменение секущего E_c^{sek} модуля деформаций и коэффициента упругости ν_c с ростом нагрузки исследованных серий А; В и С тяжелого бетона прочностью $f_{cm,10} = 19,2; 39,7; 64,4$ МПа

Выводы. Обоснован выбор феноменологической зависимости, позволившей описать полные равновесные диаграммы деформирования и разрушения одноосно сжатого бетона (3, 4). Определено выражение секущего модуля упругости (8), коэффициента упругости (9) на всех уровнях нагружения, характеризующих процесс изменения упруго-пластических свойств центрально сжатого бетона с ростом нагрузки.

Предложены аналитические выражения (3, 4) описания полных равновесных диаграмм деформирования и разрушения одноосно сжатого бетона призмочной прочностью $f_{cm,15} = 18,5; 38,2; 62,0$ МПа. Они позволяют количественно и качественно оценивать кратковременную прочность, деформативность и процесс разрушения одноосно сжатых элементов из ТБ с учетом влияния масштабного эффекта и др. значимых факторов.

Результаты исследований могут быть использованы для прогноза технического состояния бетонных и железобетонных конструкций на стадии их проектирования, строительства и эксплуатации, а также совершенствовании теории деформирования и разрушения неоднородно сжатого бетона и железобетона.

Литература

1. ГОСТ 24452-80. Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона.- М.: Изд-во стандартов, 1981. – 55с.
2. ДБН В.2.6.-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення проектування.-К.:Мінрегіонбуд України, 2009. – 96с.
3. Берг О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона / О.Я. Берг. – М.: Стройиздат, 1962. – 96 с.
4. Байков В.И. Построение зависимости между напряжениями и деформациями сжатого бетона по системе нормируемых показателей / В.И. Байков, С.В. Горбатов, З.А. Димитров // Изв. вузов. Стр-во и архитектура, 1977. – № 6. С. 65 - 71.
5. Бачинский В.Я. Связь между напряжениями и деформациями бетона при кратковременном неоднородном сжатии / В.Я. Бачинский, А.Н. Бамбура, С.С. Ватагин // Бетон и железобетон, 1984. – №10. – С.18-19.
6. Жуков В.В. Изучение процесса разрушения бетона после пожара с использованием полных диаграмм деформирования / В.В. Жуков, В.И. Шевченко // Изв. вузов. Стр-во и архитектура. 1988. – № 3. – С.2 - 6.
7. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона / Н.И. Карпенко. – Москва.: Стройиздат, 1996. – 411с.
8. Мишутин А.В. Процесс разрушения одноосно сжатого бетона /А.В. Мишутин, В.М. Кобринец, В.В. Совгира // Вісник ОДАБА. – Одеса, 2014. – Вип. № 55. С. 185-197.
9. Назаренко В.Г. Диаграмма деформирования бетонов с учетом ниспадающей ветви / В.Г. Назаренко, А.В. Боровских // Бетон и железобетон. – 1999. – № 2. – С.18-22.
10. Совгира В.В. Деформирование неоднородно сжатого мелкозернистого бетона / Р.В. Совгира // Сборник студенческих научн. трудов, посвященных 75-летию ОГАСА. Одесса, 2005. – С.176-179.
11. Совгира В.Н. О упругопластических характеристиках бетона при одноосном и внецентренном сжатии /В.Н. Совгира, В.В. Совгира // Вісник ОДАБА. – Одеса, ОДАБА, 2008. – Вип. №31. – С. 269-274.
12. Совгира В.Н. К вопросу об аналитическом описании диаграммы деформирования бетона / В.Н. Совгира, В.М. Кобринец, В.В. Совгира // Вісник ОДАБА. – Одеса, ОДАБА, 2008. – Вип.№32. – С. 289-297.
13. Узун И.А. Реализация диаграмм деформирования бетона при однородном и неоднородном напряженных состояниях / И.А.Узун // Бетон и железобетон. 1991. – №8. С. 19-20.
14. 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. 1989, вып.17, С.107-113.
15. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1: General rules and rules for buildings.- European Committee for standardization, 2002, – 226 с.