

УДК 691.32:624.012.41

О УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ БЕТОНА ПРИ ОДНООСНОМ И ВНЕЦЕНТРЕННОМ СЖАТИИ

Совгира В.Н., Совгира В.В. (Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса)

Приведены результаты исследований деформирования коротких одноосно и внецентренно сжатых элементов из тяжелого бетона. Выполнен анализ упруго-пластических свойств деформирования однородно и неоднородно сжатого бетона.

Современные методы расчетов изгибаемых и внецентренно сжатых бетонных и железобетонных конструкций содержащиеся в нормах проектирования стран СНГ и большинства зарубежных стран, в том числе в нормах ЕКБ-ФИП основаны на расчетных моделях, базирующихся на единых принципах, основными из которых являются гипотеза плоских сечений и диаграммы деформирования материалов. Предложенный подход позволяет с единых позиций осуществлять расчет конструкций по прочности, образованию и раскрытию трещин и по деформациям.

Выполняемые исследования свидетельствуют о достаточно хорошем согласовании результатов с экспериментами, однако не имеют общей основы в расчетах при различных видах предельных состояний. В СНиП 2.03.01 - 84 „Бетонные и железобетонные конструкции ” методы расчета бетонных и железобетонных конструкций насыщены большим числом эмпирических соотношений из-за чего, зачастую, приводят к потере явного физического смысла или затруднению при расчетах.

Совершенствование методик расчетов и развитие теоретических основ определения напряженно - деформированного состояния (НДС) изгибаемых и внецентренно нагруженных бетонных и железобетонных конструкций связано с уточнением параметров диаграмм деформирования бетона при однородном напряженном состоянии и совершенствованием методик трансформирования их на неоднородное напряженное состояние.

Комплексные исследования в этой области продолжаются.

Результаты выполненных работ [1...9] свидетельствуют, что какой бы полной ни была информация о поведении одноосно сжатого бетона она не будет адекватно отражать НДС неоднородно сжатого бетона, характерного для сжатой зоны изгибаемых и внецентренно нагруженных бетонных и железобетонных конструкций. Правомерность переноса диаграммы зависимости $\sigma_b - \epsilon_b$ одноосно сжатого бетона на неоднородно сжатый (при изгибе и внецентренном сжатии) оспаривается.

Учитывая важность для практики установления надежной связи между $\sigma_{b,e}$ и $\epsilon_{b,e}$ бетона в условиях НДС (внецентренное сжатие), проведены исследования сопротивления внецентренному сжатию масштабно подобных коротких колонн из обычного тяжелого бетона прочностью (23,8...81,6 МПа) и, с целью исключения влияния неоднородности материала образцов, мелкозернистого бетона широкого диапазона прочностей по методике, изложенной в работах [3; 5...7].

Анализ имеющихся в литературе экспериментальных данных [1; 2; 4; 8 и др.] и результаты опытов авторов [3...7] позволили обнаружить ряд принципиальных особенностей, характеризующих упруго-пластические свойства бетона в процессе его деформирования при кратковременном одноосном и внецентренном сжатии. Установлено, что поперечные относительные деформации ϵ_{by} центрально сжатого бетона значительно превышают аналогичные деформации наиболее сжатых волокон внецентренно нагруженных образцов при равной продольной деформации ϵ_{bx} [5 и 7] .

Анализ объемных изменений бетона [5 и 7] (согласно известной теории [1]) в процессе его нагружения показывает, что положение точек максимальных значений объемной относительной деформации θ_b наиболее сжатого слоя внецентренно нагруженных бетонных элементов расположены значительно выше, чем в одноосно сжатом бетоне, т.е. соответствуют более высоким значениям продольных ϵ_{bx} . Данное явление может иметь место в том случае, если наиболее сжатые слои бетона работают в условиях сложного НДС, которое возникает из-за перераспределения поперечных деформаций по высоте сечения. В этом случае рост поперечной ϵ_{by} наиболее напряженной части сечения сдержи-

вается запаздывающей $\varepsilon_{\beta y}$ соседней менее нагруженной части. Это влияние является, по-видимому, основной причиной повышения продольной деформации $\varepsilon_{\beta x, e}$ внецентренно сжатого бетона без его разрушения и, следовательно, возрастания прочности наиболее нагруженной части сечения. Аналогичные результаты наблюдаются в исследованиях [1; 4]

Сравнительный анализ происходящих в бетоне процессов деструкций, если судить по изменению времени распространения в нем ультразвука с ростом нагрузки, показал, что расположение уровней параметрических точек R_{crk}^0 и R_{crk} [1] центрально сжатого бетона, характеризующих степень развития деструкции в бетоне, находятся значительно ниже R_{crk}^0 и R_{crk} наиболее нагруженных слоев сечения внецентренно сжатых бетонных элементов при равных продольных деформациях $\varepsilon_{\beta x, e}$ [5 и 7].

Замедленное развитие деструктивных процессов внецентренно сжатого бетона объясняется наличием сложного напряженного состояния (двухосное сжатие) в наиболее нагруженной части сечения при отсутствии внешней поперечной нагрузки.

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. В настоящее время имеется большое число предложений, рассмотренных в работах [2; 10...13] для описания диаграмм деформирования бетона, но только для условий простейших нагружений - стандартного кратковременного сжатия. Наиболее простыми видами аппроксимации экспериментальных диаграмм являются: диаграммы жесткопластического тела, диаграммы Прандтля, диаграммы с линейным упрочнением. Часто используют выражения зависимости $\sigma_{\beta} - \varepsilon_{\beta}$ в виде степенного закона, уравнений квадратной или кубической параболы и др.

Достоинства и недостатки аналитических выражений аппроксимирующих зависимость σ_{β} и ε_{β} общеизвестны. Они более или менее хорошо описывают отдельные участки диаграмм $\sigma_{\beta} - \varepsilon_{\beta}$, но плохо отражают кривые на других уровнях напряжений.

Рассмотренные в работах [2; 8; 9; 11...13 и др.] аналитические зависимости $\sigma_b - \varepsilon_b$ 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 и неоднородно сжатого бетона, а аппроксимирующие функции не удовлетворяют некоторым феноменологическим закономерностям его деформирования.

Обобщение экспериментальных данных о деформировании одноосно сжатого тяжелого бетона (ТБ), содержащихся в литературе и, результатов наших опытов позволило установить характерный для этого напряженного состояния вид функции $\sigma_b f(\varepsilon_b)$. Поскольку из уравнения $\sigma_b f(\varepsilon_b)$ обычно исключают t, ν_σ (или ν_ε), оно для условий кратковременного сжатия должно содержать, как минимум координаты одной точки, принадлежащей фактической кривой (например, $\sigma_b = R_b$ и $\varepsilon_{bхu}$) не считая начала координат. Учитывая феноменологические требования к зависимости $\sigma_b - \varepsilon_b$ (при $\sigma_b \rightarrow 0, d \sigma_b / d \varepsilon_b = E_{b(0)}$ и при $\sigma_b = R_b, d \sigma_b / d \varepsilon_b = 0$), уравнение касательного модуля деформаций при стандартном кратковременном сжатии предложено В.Е. Ящуком [3] в виде

$$E_b = d \sigma_b / d \varepsilon_b = E_{b(0)} [1 - \sigma_b / R_b]^{1 - \bar{\nu}_b}, \quad (1)$$

где $E_{b(0)}$ - начальный модуль упругости, $E_{b(0)} = \sigma_b / d \varepsilon_b = \operatorname{tg} \alpha_0$. $\bar{\nu}_b$ - предельный коэффициент упругости центрально сжатого бетона: $\bar{\nu}_b = R_b / E_{b(0)} \cdot \varepsilon_{bхu}$. Решением дифференциального уравнения (1) с учетом начальных условий $\sigma_b = 0$ и $\varepsilon_b = 0$ для $\bar{\nu}_b \neq 1$ получим удобные для применения зависимости :

$$\sigma_b(r) = R_b(r) [1 - [1 - \varepsilon_{bx}(r) / \varepsilon_{bхu}(r)]^{1/\bar{\nu}_b}], \quad (2)$$

$$\varepsilon_{bx}(r) = \varepsilon_{bхu}(r) [1 - [1 - \sigma_b(r) / R_b(r)]^{\bar{\nu}_b}] \quad (3)$$

в которых $\varepsilon_{bхu}(r)$ - предельные продольные относительные деформации, зависящие от прочности одноосно сжатого ТБ R_b и размеров сечения призматических образцов - условного радиуса сечения r , равного отношению площади сечения образца к его

периметру. Зависимость $\varepsilon_{\sigma_{xu}} f(R_{\sigma}(r))$ для кратковременного сжатия аппроксимирована в [3; 6] выражением

$$\varepsilon_{\sigma_{xu}}(r) = R_{\sigma}(r) / (E_{\sigma(0)} \cdot \bar{V}_{\sigma}), \quad (4)$$

где $R_{\sigma}(r)$ - временное сопротивление осевому сжатию призматических образцов из ТБ : $R_{\sigma}(r) = R_{\sigma 15} (2,05 + r) / (1,6 + 1,12 r)$, $R_{\sigma 15}$ - временное сопротивление сжатию стандартных базовых призм сечением 150 x 150 мм, МПа); $E_{\sigma(0)}$ - начальный модуль упругости при осевом сжатии, который зависит от прочности ТБ, $E_{\sigma(0)} = (7400 \cdot R_{\sigma 15}) / (24 + R_{\sigma 15})$, МПа; \bar{V}_{σ} - уточненный предельный коэффициент упругости центрально сжатых базовых призм из ТБ : $\bar{V}_{\sigma} = (19 + R_{\sigma 15}) / (102 + 0,4 R_{\sigma 15})$.

Зависимость (2) аналогична по виду выражению, предложенному Сен-Венаном для описания распределения напряжений по высоте сечения балки из материала с нелинейной связью $\sigma - \varepsilon$. Формула (2) рекомендована [10] для кратковременного сжатия лишь при $\bar{V}_{\sigma} = 0,5$.

Зависимость (2) соответствует загрузению бетона с $\bar{V}_{\sigma} = d\sigma/dt = const$ и не описывает нисходящую ветвь диаграммы $\sigma_{\sigma} - \varepsilon_{\sigma}$ ($v_{\varepsilon} = const$), поскольку форма ниспадающей ветви существенно зависит от скорости деформирования образца и, следовательно, может быть различной. На основе рекомендаций ЕКБ - ФИП можно аппроксимировать этот участок диаграммы преобразованной формулой из [13] в вид :

$$\sigma_{\sigma}(r) = R_{\sigma}(r) / [1 + a R_{\sigma}(r) [(\varepsilon_{\sigma_x}(r) / \varepsilon_{\sigma_{xu}}(r)) - 1]^2], \quad (5)$$

$$\varepsilon_{\sigma_x}(r) = \varepsilon_{\sigma_{xu}}(r) \cdot (1 + \sqrt{(1 - \eta) / a \cdot R_{\sigma}(r) \cdot \eta}), \quad (6)$$

где a - функция заданной скорости деформаций (для некоторых средних условий, по данным [13], ее можно принять равной 1/55); $\eta = \sigma_{\sigma}(r) / R_{\sigma}(r)$ - относительные уровни напряжений на нисходящей ветви диаграмм.

Полученные диаграммы $\eta - \varepsilon_{\sigma_x}$ одноосно сжатого тяжелого бетона представлены на рис.1, где кривые 1...3 построены по результатам опытов, а 1' ... 3' - по формулам (2 и 5). Проверка адекватности выражения (2) по Фишеру для исследованного

диапазона прочностей ТБ показала, что оно достоверно при 5%-ном уровне значимости.

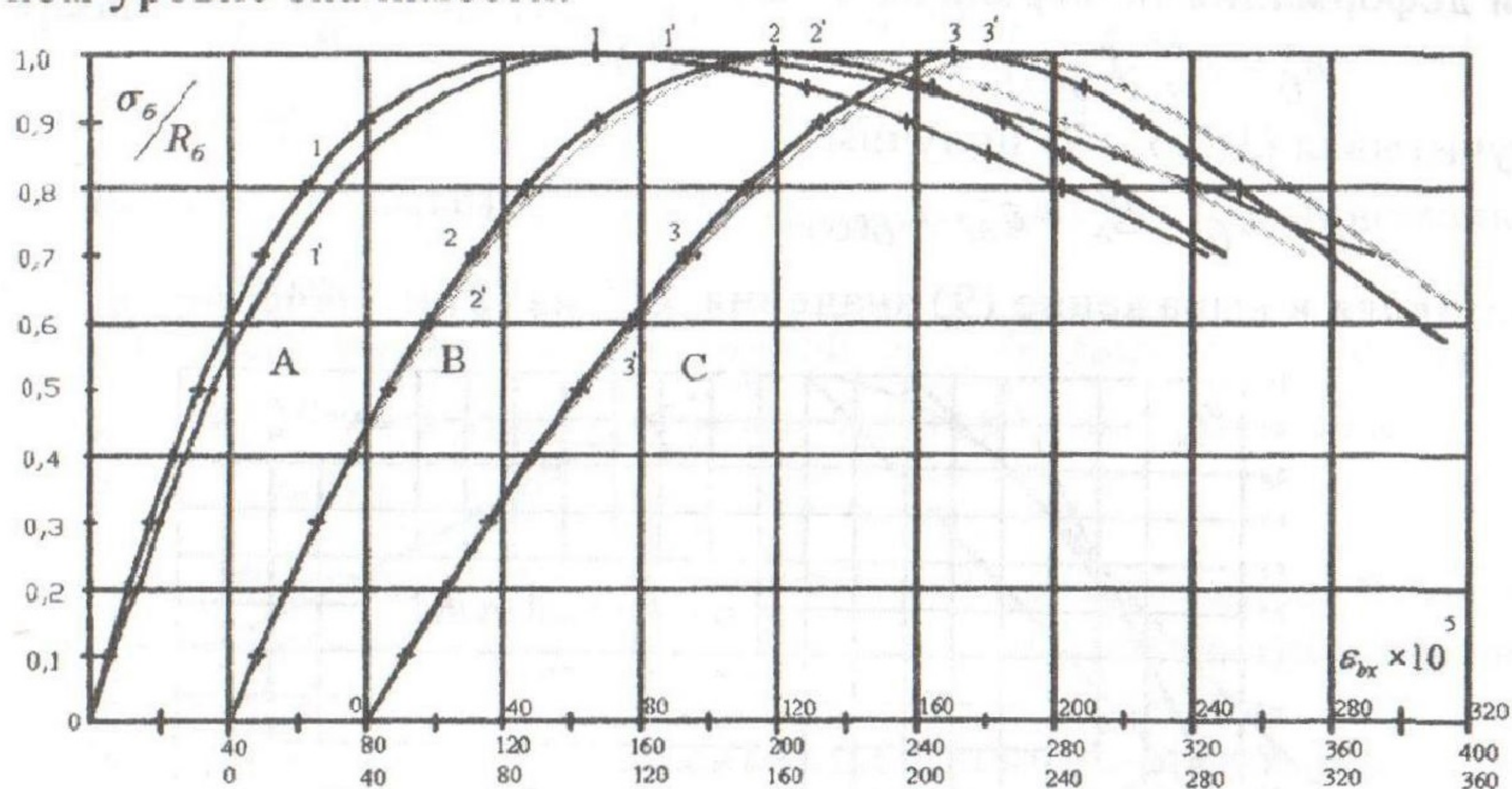


Рис.1. Диаграммы $\eta - \epsilon_b$ одноосно сжатого бетона: 1; 2 и 3-опытные кривые образцов серий А; В и С с прочностью соответственно $R_m = 23,8; 50,5$ и $81,6$ МПа и сечением 10×10 см. 1';2' и 3' – кривые по (2 и 5)

Так как начальный модуль упругости ($E_{b(0)}$) равен тангенсу угла наклона касательной к кривой $\sigma_b - \epsilon_b$ в начале координат (при $\sigma_b \rightarrow 0$ и $\epsilon_b \rightarrow 0$), являющейся также предельным положением для секущей к этой кривой то :

$$E_{b(0)} = \lim_{\sigma \rightarrow 0} \frac{\sigma_b}{\epsilon_b} = \lim_{\sigma \rightarrow 0} \operatorname{tg} \alpha = \lim_{\sigma \rightarrow 0} E_b = E_{b(0)} [1 - \sigma_b / R_b]^{1 - \bar{\nu}_b} = \lim_{\sigma \rightarrow 0} \operatorname{tg} \alpha' = \lim_{\sigma \rightarrow 0} E'_b, \quad (7)$$

где $E_{b(0)}$ и E_b – начальный и касательный модуль упругости, угол α_0 и α устанавливаются по опытной кривой $\sigma_b - \epsilon_b$, описанной аналитическим выражением (2).

Из зависимости (7) следует, что наибольшее приближение секущего модуля упругости (E'_b) к касательному (E_b) или начальному ($E_{b(0)}$) возможно при малых величинах напряжений $\sigma_b = 0,05 \dots 0,2R_b$ при которых по восходящей кривой $\sigma_b - \epsilon_b$ (рис.2), согласно рекомендациям СНиП 2.01.07 - 84 определяются их значения. Допуская, что бетон на этом участке кривой $\sigma_b - \epsilon_b$

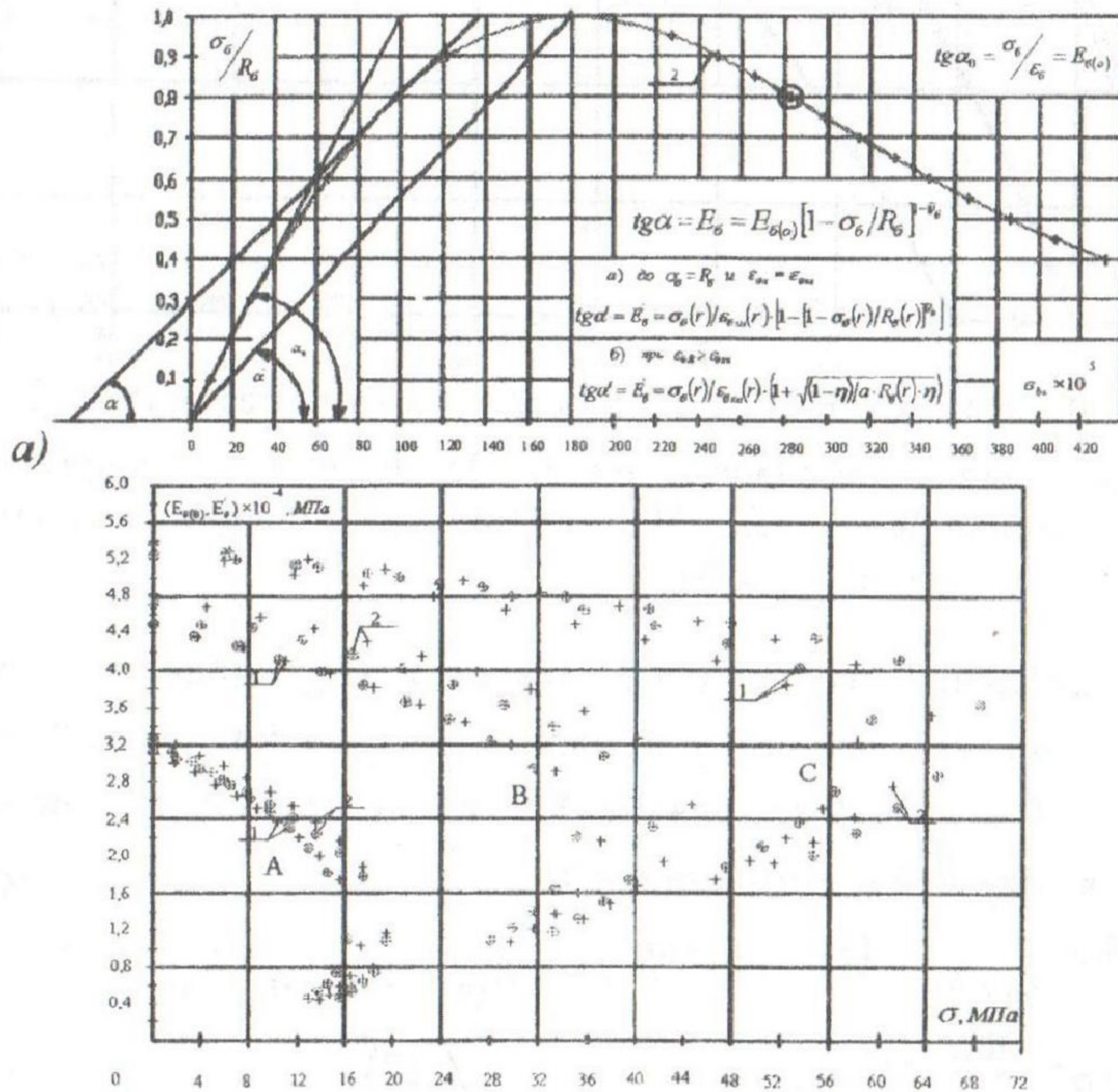
подчиняется линейному закону, зависимость между напряжениями и деформациями выражена в виде

$$\sigma_b = \varepsilon_{bx}^{yn} \cdot E_b(0) \quad (8)$$

то, учитывая (1;2;3 и 7) получим:

$$\sigma_b = \varepsilon_{bx} \cdot E'_b = \varepsilon_{bx}^{yn} \cdot E_b(0), \quad (9)$$

подставляя в выражение (9) значения ε_{bx}^{yn} из (8) и значение ε_{bx}



б) *Рис. 2.* Упруго – пластические характеристики бетона при сжатии образцов до разрушения по результатам опытов [3; 5]; а – диаграмма деформирования одноосно сжатого бетона образца – 2 сечением 10 х 10 см с начальным $E_b(0)$, касательным E'_b и секущим E_b модулем упругости; б – зависимость $E'_b - \sigma_b$ бетонных колонн серий А; В и С сечением 60х20см -1 и сечением 10х10см - 2; \oplus - опыты авторов; $+$ - теоретические по (10 и 11), с использованием R_b из СНиП 2.03.01-84

из (3) получим выражение секущего модуля E'_σ по восходящей кривой $\sigma_\sigma - \varepsilon_\sigma$ до достижения $\sigma_\sigma = R_\sigma$ и $\varepsilon_{\sigma x} = \varepsilon_{\sigma x u}$

$$E'_\sigma = \sigma_\sigma(r) / \varepsilon_{\sigma x u}(r) [1 - [1 - \sigma_\sigma(r) / R_\sigma(r)]^{\bar{V}_\sigma}], \quad (10)$$

где \bar{V}_σ - предельный коэффициент упругости центрально сжатого бетона.

Для ниспадающей ветви кривой $\sigma_\sigma - \varepsilon_\sigma$ выражение секущего модуля E'_σ с учетом $\varepsilon_{\sigma x}$ из (6) может быть представлено в виде

$$E'_\sigma = \sigma_\sigma(r) / \varepsilon_{\sigma x u}(r) \cdot (1 + \sqrt{(1-\eta)/a \cdot R_\sigma(r) \cdot \eta}), \quad (11)$$

где a - функция скорости деформации, т.е. $a = f(V_\varepsilon)$ и для некоторых средних условий, по данным [13], ее можно принять равной 1/55).

Неоднородное сжатие вносит существенные изменения в связь между $\sigma_{\sigma e}$ и $\varepsilon_{\sigma x e}$ бетона. Здесь предельные относительные деформации $\varepsilon_{\sigma x e u}$ наиболее нагруженной грани внецентренно сжатых бетонных колонн значительно больше $\varepsilon_{\sigma x u}$ центрально сжатых образцов-близнецов и не являются величиной постоянной для данного вида бетона.

Значения $\varepsilon_{\sigma x e u}$ зависят от высоты сечения (h) элемента, относительного эксцентриситета (e_0/h) и прочности тяжелого бетона $R_\sigma(r)$. Функция $\varepsilon_{\sigma x e u}(e_0, h, R_\sigma)$ описывается выражением

$$\varepsilon_{\sigma x e u} = \varepsilon_{\sigma x u}(r) \cdot \gamma_\varepsilon, \quad (12)$$

где γ_ε - коэффициент условий деформирования неоднородно сжатого бетона, зависящий от эксцентриситета приложения нагрузки и упругопластических свойств ТБ - предельного коэффициента упругости ($\bar{V}_{\sigma e}$). Характер изменения коэффициента γ_ε исследован на внецентренно сжатых элементах с $e_0/h = 0 \dots 1/6$.

Зависимость $\gamma_\varepsilon(e_0, h, \bar{V}_{\sigma e})$ для тяжелого бетона имеет вид

$$\gamma_\varepsilon = 1 + (e_0/h)^2 \cdot 1/\bar{V}_{\sigma e} [338(e_0/4h) - 832(1/18 - (e_0/h)^2)]. \quad (13)$$

Опытные значения $\varepsilon_{\sigma x e u}$ хорошо согласуются с вычисленными по формулам (12 и 13). Для оценки связи $\varepsilon_{\sigma x e u}$ и (e_0, h, R_σ) в нелинейной зависимости (12) определено множественное корре-

ляционное отношение $\eta_0 = 0,85$. Средняя относительная ошибка аппроксимаций ε для выражений (12 и 13) составляет 4,5%.

Исследования показали, что действительное напряженно-деформированное состояние сжатой зоны неоднородно нагруженных элементов не отвечает расчетному, полученному по полной диаграмме осевого сжатия; связь между напряжениями и деформациями волокон бетона отличается от центрально сжатого бетона. Такая особенность - следствие эффекта Баушингера [8], проявляющегося при наличии градиента эпюры деформаций в сечении образца. В то же время диаграмма напряжения-деформации внецентренно сжатых коротких бетонных колонн хорошо описывается выражением, аналогичным связи между $\sigma_b - \varepsilon_b$ осевого сжатия,

$$N_e / N_{ue} = 1 - (1 - \varepsilon_{bxe} / \varepsilon_{bxeu})^{1/\bar{V}_{be}}, \quad (14)$$

где \bar{V}_{be} в (13 и 14) - предельный коэффициент упругости неоднородно сжатого ТБ, приблизительно равный \bar{V}_b одноосно сжато; N_{ue} - несущая способность внецентренно сжатых

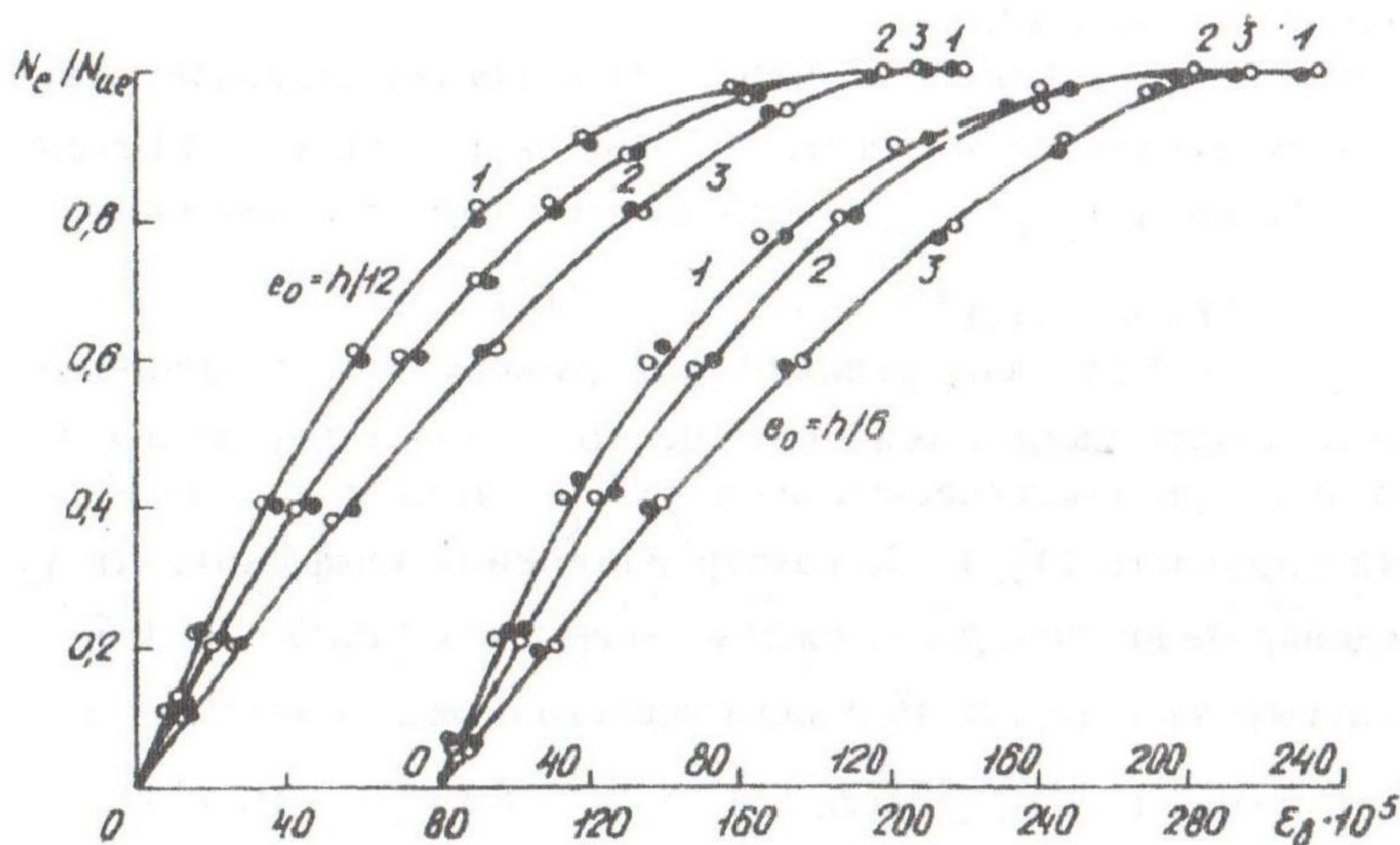


Рис. 3. Диаграммы $N_e / N_{ue} - \varepsilon_{bxe}$ бетона наиболее нагруженной грани внецентренно сжатых коротких колонн сечением 60x20 см с $e_0 = h/12$ и $h/6$ и кубиковой прочностью бетона колонн серий: 1 - 23,8; 2 - 50,5; 3 - 81,6 МПа

коротких колонн из тяжелого бетона, с учетом влияния размеров их сечения, определяется по формуле

$$N_{ue} = N_u(r) \cdot \gamma_R / (1 + 6 e_0/h), \quad (15)$$

в которой $N_u(r) = R_b(r) \cdot A_b$, кН; γ_R - уточненный коэффициент условий работы неоднородно сжатого тяжелого бетона, зависящий от h и e_0 :

$$\gamma_R = [(84 - 172 e_0/h) e_0/h + \sqrt{h}] / [(52 - 126 e_0/h) e_0/h + \sqrt{h}]. \quad (16)$$

Выражения (2) и (14) отражают диалектическое единство связи между усилиями и деформациями бетона, работающего в условиях однородного и неоднородного напряженных состояний, и косвенно подтверждают достоверность принятых предпосылок.

Теоретические кривые (рис. 3) построены по зависимости (14). С учетом приемлемости гипотезы плоских сечений для внецентренно сжатых коротких колонн из тяжелого бетона при помощи уравнения (14) можно определять связь между внешним усилием и деформацией любого волокна сжатой зоны.

Выводы

Внецентренное сжатие сдерживает рост поперечных деформаций наиболее напряженной грани коротких колонн из тяжелого бетона в сравнении с центральным сжатием, следствием чего является замедление процесса накопления микроразрушений, возрастание предельных продольных деформаций и увеличение предела прочности бетона наиболее нагруженной части сечения.

Обоснован выбор феноменологической зависимости для описания диаграмм сжатия бетона при кратковременном действии центрально и внецентренно приложенной нагрузки.

На основании зависимостей (1; 2; 5 и 6), описывающих диаграммы $\sigma_b - \varepsilon_b$, определено выражение секущего модуля упругости одноосно сжатого бетона на всех уровнях нагружения, необходимого для решения различных задач в практике проектирования конструкций и в теории бетона и железобетона.

Установлено, что предельная деформация при внецентренном сжатии - величина переменная, зависящая от эксцентриситета приложения нагрузки, высоты сечения образца и других факторов.

Полученные количественные оценки кратковременной прочности и деформаций центрально и внецентренно сжатых элементов из тяжелого бетона с учетом значимых факторов повышают

надежность прогноза фактической несущей способности неоднородно сжатых конструкций при проектировании строительства, реконструкции и капитального ремонта зданий и сооружений.

Литература

1. Берг О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона.- М.: Стройиздат, 1962. - 96 с.
2. Бачинский В.Я., Бамбура А.Н., Ватагин С.С. Связь между напряжениями и деформациями бетона при кратковременном неоднородном сжатии // Бетон и железобетон.- 1984.- №10.-С.18-19.
3. Ящук В.Е., Совгира В.Н. О прочности и деформациях неоднородно сжатого бетона //Гидромелиорация и гидротехническое строительство/ Респ. межвед.научно-техн. сб. 1989, вып.17, с.107-113.
4. Чайка В.П. Особенности деформирования тяжелого бетона при неоднородном кратковременном сжатии // Бетон и железобетон. -1987- №1.С.42-43.
- 5.Совгира В.Н., Совгира Р.В. Факторы, влияющие на деформирование тяжелого бетона // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Вип.№15 - Одеса: ОДАБА, 2004. С.269-274.
6. Совгира В.Н., Совгира Р.В. Некоторые особенности деформирования неоднородно сжатого мелкозернистого бетона // Известия высших учебных заведений северо-кавказский регион/Спецвыпуск "Актуальные проблемы строительства и архитектуры", 2005, с. 91...96.
7. Совгира В.В., Совгира Р.В. Деформирование неоднородно сжатого мелкозернистого бетона // Сборник студенческих научн. трудов, посвященных 75-летию ОГАСА. Одесса. 2005.- с.176-179.
8. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона . - Москва.: Стройиздат, 1996.- 411с.
9. Узун И.А. Реализация диаграмм деформирования бетона при однородном и неоднородном напряженных состояниях // Бетон и железобетон. 1991-№8.С.19-20.
10. Байков В.И., Горбатов С.В., Димитров З.А. Построение зависимости между напряжениями и деформациями сжатого бетона по системе нормируемых показателей//Изв. вузов. Стр-во и архитектура. 1977. № 6. С.65 - 71.
11. Дорофеев В.С., Барданов В.Ю. Расчет изгибаемых элементов с учетом полной диаграммы деформирования бетона.- Одесса.: Издательство ОГАСА, 2003.- 210 с.
12. Назаренко В.Г., Боровских А.В. Диаграмма деформирования бетонов с учетом ниспадающей ветви// Бетон и железобетон.- 1999. - № 2.- С.18-22.
13. Кодекс-образец ЕКБ - ФИП / Для норм по ЖБК.- Т.11.- Евро-международный комитет по бетону.-М.:1984.-С.263.