

О ПРОЧНОСТИ И ДЕФОРМАЦИЯХ ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТОГО КОНСТРУКЦИОННОГО КЕРАМЗИТОБЕТОНА

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

Изложены результаты исследования напряженно – деформированного состояния внецентренно сжатых керамзитобетонных коротких колонн при изменении физико-механических и геометрических характеристик. Предложены аналитические зависимости прочности и предельных деформаций от размеров сечения, эксцентриситета нагрузки и прочности керамзитобетона.

Отечественный и зарубежный опыт свидетельствует о целесообразности и эффективности использования конструкционного керамзитобетона при возведении, реконструкции и капитальном ремонте жилых и общественных зданий в условиях стеснённых площадей, в районах со слабыми грунтами и повышенной сейсмичностью, а также при строительстве уникальных зданий. Кроме технологических и конструктивных преимуществ в сложных геологических условиях и при воздействии сейсмических нагрузок реализуются более благоприятные характеристики керамзитобетона: повышенная деформативность, упругость, пластичность и другие параметры, способствующие правильному перераспределению усилий.

Применение легкого бетона, в частности керамзитобетона (КБ) на местном заполнителе ограничен, в основном, стеновыми ограждающими конструкциями. В то же время эффективность снижения веса конструкций очевидна.

С целью расширения номенклатуры изделий из конструкционного КБ для зданий и сооружений, в ОГАСА систематизированы сведения из литературных источников и проведены дополнительные исследования его физико - механических свойств в широком диапазоне изменения прочности. Изучено влияние размеров образцов на прочность и деформации КБ при

внецентренном сжатии. Изготовлено и испытано на осевое и внецентренное сжатие 147 геометрически подобных керамзитобетонных образцов -прямоугольных призм с высотой сечения $h = (60; 40; 20; 10 \text{ и } 5)$ см, шириной $h/3$ и длиной $l = 3h$ по методике, изложенной в работах [1...3]. В опытах использован конструкционный керам-зитобетон плотностью $1700 \dots 1900 \text{ кг/м}^3$ и прочностью $R_m = (17,0; 28,5 \text{ и } 36,6)$ МПа без моделирования структуры бетона. Возраст образ-цов на период испытания составлял 9...10 месяцев. При исследовании геометрически подобных коротких керамзитобетонных колонн выдер-жано полное подобие в технологии изготовления и методике испытания образцов (схеме загрузки, условиях передачи нагрузки и др.).

В процессе нагружения образцов измеряли их деформации датчи-ками сопротивления и индикаторами часового типа до уровня \bar{P} .

Деформации призм замеряли в продольном и поперечном направле-нии, причем во внецентренно сжатых образцах фиксировали в четырех-пяти точках по высоте сечения. Результаты измерений продольных де-формаций $\epsilon_{\nu x \nu}$ внецентренно сжатых призм подтвердили приемлемость гипотезы Бернулли: на любом этапе испытания деформации $\epsilon_{\nu x}$ распре-деляются практически линейно по высоте сечения образца.

В результате исследований обнаружены некоторые особенности де-формирования керамзитобетона в условиях однородного и неод-нородно-го напряженного состояния [3]. При центральном сжатии колонн из КБ предельные продольные относительные деформации($\epsilon_{\nu x \nu}$) зависят от прочности керамзитобетона R_B и размеров сечения – условного радиуса сечения r , равного отношению площади сечения образца к его периметру.

Зависимость $\epsilon_{\nu x \nu} (R_{Bx}, r)$ для кратковременного сжатия описывается выражением

$$\epsilon_{\nu x \nu} (r) = R_B(r) / (E_B(0) \cdot \bar{\lambda}_B), \quad (1)$$

где $R_B(r)$ - временное сопротивление осевому сжатию призматических образцов из КБ : $R_B(r) = R_{B15} (3,15+r) / (2,1+1,28r)$; (R_{B15} – временное сопротивление на сжатие базовых призм сечением 150×150 мм, МПа); $E_B(0)$ - начальный модуль упругости при осевом сжатии, который зависит от прочности КБ , $E_B(0) = (76000 \cdot R_{B15}) / (70 + R_{B15})$, МПа;

$\bar{\lambda}_e$ - уточненный предельный коэффициент упругости центрально сжатых колонн из КБ: $\bar{\lambda}_e = (62 + R_{e15}) / (111 + 0,45 R_{e15})$. Обобщение экспериментальных данных о деформировании одноос-но сжатого КБ, содержащихся в литературе и, результатов наших опытов позволило установить характерный для этого напряженного состояния вид функции $\sigma_e(\epsilon_e)$. Поскольку из уравнения $\sigma_e(\epsilon_e)$ обычно исключают t, v_N (или v_e), оно для условий кратковременного сжатия должно содержать, как минимум координаты одной точки, принадлежащей фактической кривой (например, R_e и ϵ_{exu}) не считая начала координат.

Учитывая феноменологические требования к зависимости $\sigma_e - \epsilon_e$

$$\text{при } \sigma_e \rightarrow 0, d\sigma_e/d\epsilon_e = E_{e(0)} \text{ и } \sigma_e = R_e, d\sigma_e/d\epsilon_e = 0,$$

уравнение касательного модуля деформаций при стандартном кратко-временном сжатии записывается в виде

$$E_e = d\sigma_e/d\epsilon_e = E_{e(0)} [1 - \sigma_e/R_e]^{1 - \bar{\lambda}_e}, \quad (2)$$

где $E_{e(0)}$ - начальный модуль упругости. Решением дифференциального уравнения (2) с учетом начальных условий $\sigma_e = 0$ и $\epsilon_e = 0$ для $\bar{\lambda}_e \neq 1$ получим удобные для применения зависимости

$$\sigma_e(r) = R_e(r) [1 - [1 - \epsilon_{ex}(r) / \epsilon_{exu}(r)]^{1/\bar{\lambda}_e}], \quad (3)$$

$$\epsilon_{ex}(r) = \epsilon_{exu}(r) [1 - [1 - \sigma_e(r) / R_e(r)]^{\bar{\lambda}_e}], \quad (4)$$

Зависимость (3) аналогична по виду выражению, предложенному Сен-Венаном для описания распределения напряжений по высоте сечения балки из материала с нелинейной связью $\sigma - \epsilon$. Формула (3) рекомендована [4] для кратковременного сжатия лишь при $\bar{\lambda}_e = 0,5$.

Зависимость (3) соответствует нагружению бетона с $v_N = \text{const}$ и не описывает нисходящую ветвь диаграммы $\sigma_e - \epsilon_e$ (для $v_e = \text{const}$), поскольку форма ниспадающей ветви существенно зависит от скорости деформирования образца и, следовательно, может быть различной. Нисходящий участок диаграммы $\sigma_e - \epsilon_e$ в наших опытах не исследован. Однако на основе рекомендаций [5] можно аппроксимировать этот участок диаграммы формулой

$$\sigma_e(r) = R_e(r) / [1 + a R_e(r) [(\epsilon_{ex}(r) / \epsilon_{exu}(r)) - 1]^2], \quad (5)$$

$$\varepsilon_{ex}(r) = \varepsilon_{exu}(r) (1 + \sqrt{(1-n)/a R_b(r) \eta}), \quad (6)$$

где a - функция заданной скорости деформаций (для некоторых сред-них условий, по данным [5], ее можно принять равной 1/55); $\eta = \sigma_e(r) / R_e(r)$ - относительные уровни напряжений на нисходящей ветви диаг-рамм.

Полученные диаграммы $\eta - \varepsilon_e$ одноосно сжатого керамзитобетона представлены на рис.1, где кривые 1...3 и 1'...3' построены по уравнению (3). Полная диаграмма сжатия для бетонного образца размерами 180 x 60 x x 20 см и $R_m=28,5$ МПа показана на вставке рис. 1.

Проверка адекватности выражения (3) по Фишеру для исследован-ного диапазона прочностей КБ показала, что оно достоверно при 5%-ном уровне значимости.

Неоднородное сжатие вносит существенные изменения в связь между σ_{ve} и ε_{ve} керамзитобетона. Здесь предельные относительные деформации ε_{exu} наиболее нагруженной грани внецентренно сжатых

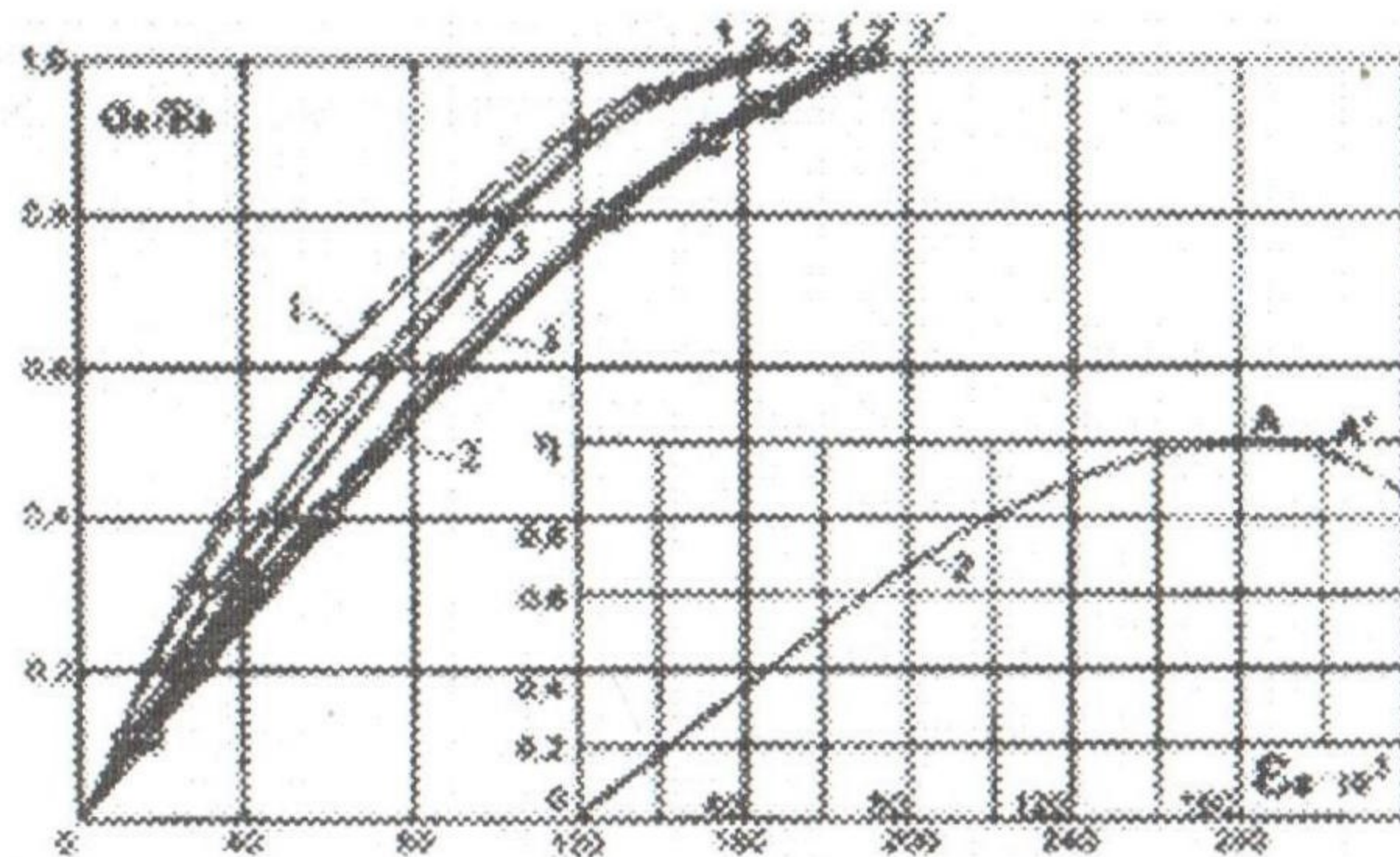


Рис.1. Диаграммы $\eta - \varepsilon_e$ одноосно сжатого керамзитобетона: 1...3 - колонны с прочностью соответственно $R_m=17,0$; 28,5 и 36,6 МПа сечением 60 x 20см; 1'...3' - то же сечением 5 x 5 см

керамзитобетонных колонн значительно больше ε_{exu} центрально сжатых образцов – близнецов и не являются величиной постоянной для данного вида бетона.

Согласно теории сопротивления неупругих материалов, зависимость между напряжениями и деформациями для однородного и

неоднородного напряженных состояний неизменна. Проверка данного утверждения опытным путем затруднена, поскольку нет надежных методов непосредственного измерения напряжений в материалах типа бетона. Однако косвенные методы дают основание полагать, что неоднородность напряженного состояния вносит существенные изменения в зависимость между σ_a и ϵ_a . Сравнение, например, внешних и внутренних усилий при внецентренном сжатии с использованием эпюр напряжений, построенных по данным центрального сжатия бетона, показывает их расхождение, увеличивающееся с ростом нагрузки (рис. 2). Особенно значительным это несоответствие становится после того, как деформации ($\epsilon_{вхей}$) наиболее нагруженных волокон внецентренно сжатых образцов превышают предельные

осевые ($\epsilon_{бу}$) и на предполагаемой эпюре напряжений неоднородно сжатого бетона появляется нисходящий участок. В этом случае внутреннее усилие в образце (объем теоретической эпюры напряжений) оказывается существенно меньше внешнего (показание прессы).

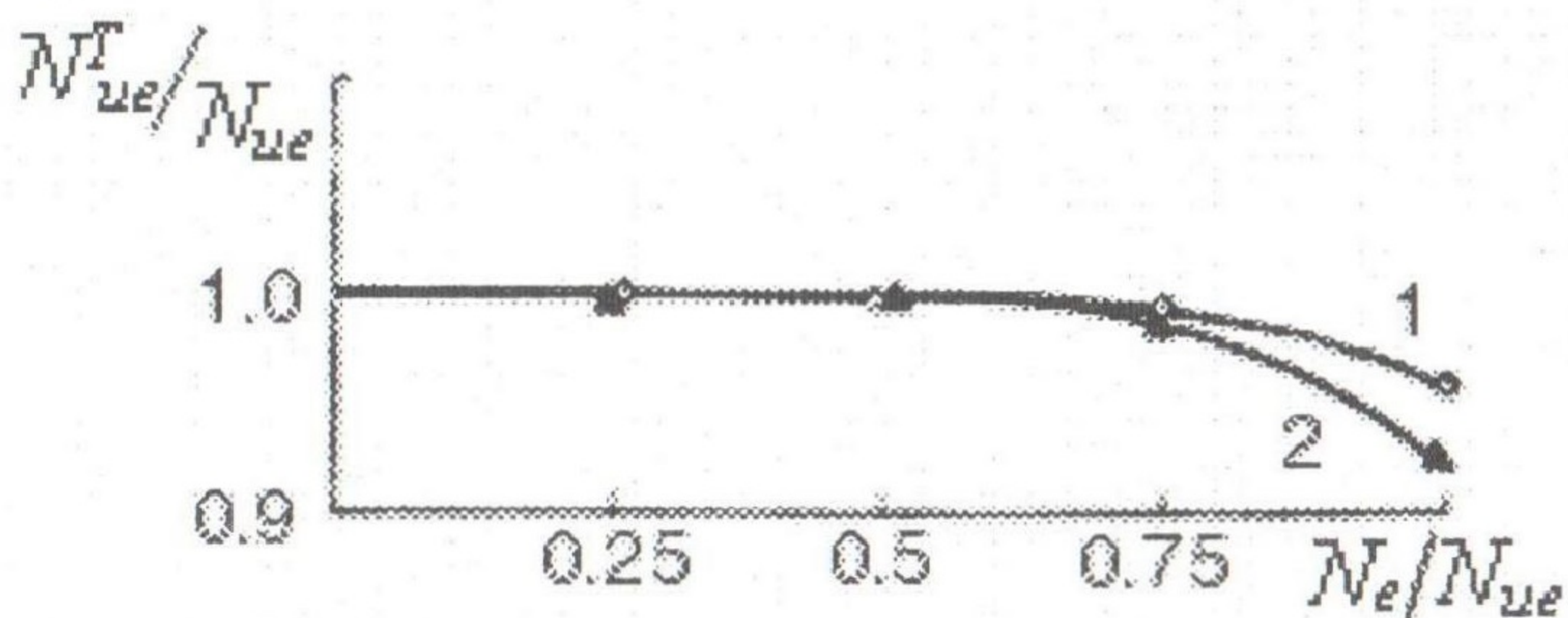


Рис. 2. Зависимость отношения теоретического объема эпюры напряжений (N_{ue}^T) к внешнему усилию (N_{ue}) от уровня нагрузки и эксцентриситета:

1 - $e_0=h/12$ (48 образцов); 2 - $e_0=h/6$ (51 образец)

Для выяснения правомерности постулата об одноосности работы его волокон в случаях градиентных эпюр напряжений и установления надежной связи между σ_b и ϵ_b бетона исследованы сопротивления внецентренному сжатию масштабно подобных коротких колонн из обычного тяже-лого бетона [1], с целью исключения влияния неоднородности материала образцов, из мелкозернистого бетона [2] и керамзитобетона широкого диапазона прочностей, так как

конструкционные керамзитобетоны находят все более широкое практическое применение в различных областях строительства, реконструкции и капитального ремонта зданий.

Предельные деформации ($\epsilon_{вхей}$) наиболее нагруженных волокон внецентренно сжатых образцов зависят от высоты сечения (h) элемента, относительного эксцентриситета (e_0 / h) и прочности керамзитобетона R_b (г). Аналогичная зависимость $\epsilon_{вхей}$ от (h); (e_0 / h) и R_b (г) наблюдается во внецентренно сжатых колоннах из тяжелого и мелкозернистого бетона [1; 2].

Функция $\epsilon_{вхей}(e_0, h, R_b)$ описывается выражением

$$\epsilon_{вхей} = \epsilon_{вхи}(г) \gamma_\epsilon, \quad (7)$$

где γ_ϵ - коэффициент условий деформирования неоднородно сжатого керамзитобетона, зависящий от эксцентриситета приложения нагрузки и упругопластических свойств КБ - предельного коэффициента упругости ($\bar{\lambda}_B$). Характер изменения коэффициента γ_ϵ исследован на внецентренно сжатых элементах с $e_0 / h = 0 \dots 1 / 6$. Зависимость $\gamma_\epsilon(e_0, h, \lambda_b)$ для керамзитобетона имеет вид

$$\gamma_\epsilon = 1 + \left(\frac{e_0}{h}\right)^2 \cdot \frac{1}{\lambda_b^{10}} \cdot \left[12,6 \cdot \left(\frac{1}{4} - \frac{e_0}{h}\right) - 27 \cdot \left(\frac{1}{18} - \left(\frac{e_0}{h}\right)^2\right) \right], \quad (8)$$

Опытные значения $\epsilon_{вхей}$ хорошо согласуются с вычисленными по формулам (7 и 8). Для оценки связи $\epsilon_{вхей}$ и (e_0, h, R_b) в нелинейной зависимости (7) определено множественное корреляционное отношение $\eta_0 = 0,867$. Средняя относительная ошибка аппроксимаций $\epsilon_{вхе}$ для выражения (7 и 8) составляет 3,8%. Исследования показали, что действительное напряженно-деформированное состояние сжатой зоны внецентренно нагруженных элементов не отвечает расчетному, полученному по полной диаграмме осевого сжатия; связь между напряжениями и деформациями волокон керамзитобетона отличается от центрального сжатия.

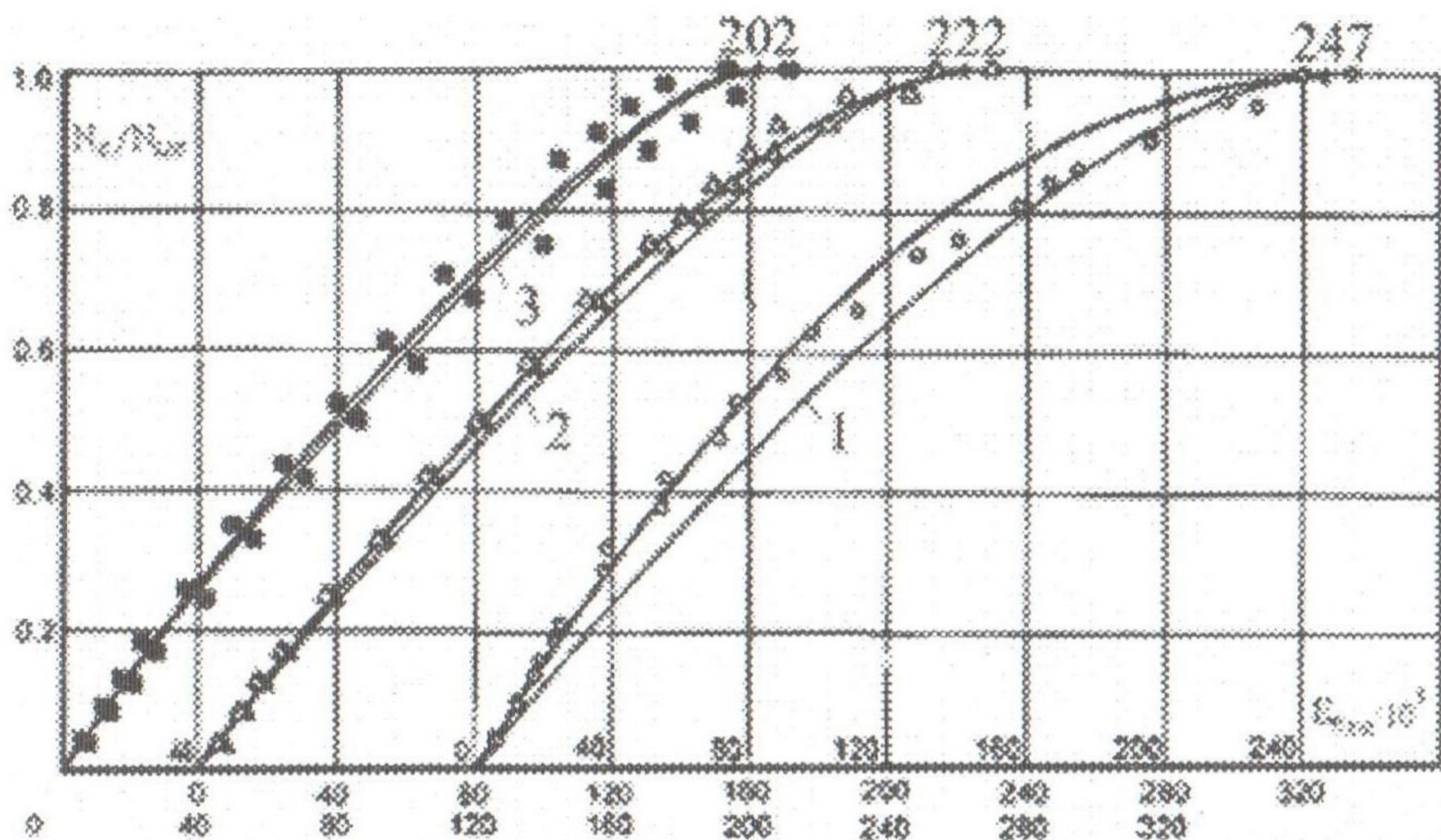


Рис. 3. Диаграммы $N_e/N_{ue} - \varepsilon_{vxe}$ керамзитобетона наиболее нагруженной грани внецентренно сжатых колонн сечением 60x20 см; для $e_0 = h/6$ кубиковая прочность керамзитобетона колонн серий: 1 - 17,0; 2 - 28,5 ; 3 - 36,6 МПа

Такая особенность - следствие эффекта Баушингера, проявляющегося при наличии градиента эпюры деформаций в сечении образца. В то же время диаграмма напряжения-деформации внецентренно сжатых коротких колонн хорошо описывается выражением, аналогичным связи между σ_e и ε_e осевого сжатия,

$$N_e/N_{ue} = 1 - (1 - \varepsilon_{vxe}/\varepsilon_{vxeu})^{1/\bar{\lambda}_{ve}}, \quad (9)$$

где $\bar{\lambda}_{ve}$ - предельный коэффициент упругости неоднородно сжатого КБ, приблизительно равный $\bar{\lambda}_e$ при осевом сжатии; N_{ue} - несущая способность внецентренно сжатых коротких колонн из керамзитобетона с учетом влияния масштабного фактора, определяемая по формуле

$$N_{ue} = N_u(r) \gamma_R / (1 + 6e_0/h), \quad (10)$$

где $N_u(r) = R_e(r) \cdot A_b$, кН; γ_R - уточненный коэффициент условий работы неоднородно сжатого керамзитобетона, зависящий от h и e_0 :

$$\gamma_R = [(132 - 316 e_0/h) e_0/h + \sqrt{h}] / [(96 - 284 e_0/h) e_0/h + \sqrt{h}]. \quad (11)$$

Выражения (3) и (9) отражают диалектическое единство связи между усилиями и деформациями керамзитобетона, работающего в условиях однородного и неоднородного напряженных состояний, и косвенно подтверждают достоверность принятых предпосылок.

Теоретические кривые (рис. 3) построены по зависимости (9). С учетом приемлемости гипотезы плоских сечений для внецентренно сжатых коротких колонн из керамзитобетона при помощи уравнения (9) 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 керамзитобетона в сравнении с центральным сжатием, следствием чего является замедление процесса накопления микроразрушений, возрастание предельных продольных деформаций и увеличение предела прочности наиболее нагруженной части сечения.

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

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

Опытами установлено, что неупругие деформации керамзитобетона

значительно меньше, чем в тяжелом и мелкозернистом бетонах, а полные $\epsilon_{вхн}$ конструкционного керамзитобетона и тяжелого бетона практически одинаковы при прочих равных условиях.

Полученные количественные оценки кратковременной прочности и деформаций центрально и внецентренно сжатых элементов из керамзитобетона с учетом влияющих факторов повышают надежность прогноза фактической несущей способности неоднородно сжатых конструкций при проектировании строительства, реконструкции и капитального ремонта зданий и сооружений жилищно-коммунального хозяйства.

Литература

1. 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.
2. Совгира В.Н., Совгира Р.В. Некоторые особенности деформирования неоднородно сжатого мелкозернистого бетона // Известия высших учебных заведений северо - кавказский регион/ Спец. выпуск "Актуальные проблемы строительства и архитектуры", 2005, с. 91... 96.
3. Совгира В.Н. Влияние значимых факторов на предельные деформации керамзитобетона // Моделирование в материаловедении/ Материалы к 37-му международному семинару по моделированию и оптимизации композитов – МОК' 37, Одесса, 1998, с. 143-144.
4. 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.
5. Международные рекомендации для расчета и осуществления обычных и предварительно напряженных железобетонных конструкций / НИИЖБ Госстроя СССР. М., 1970.