

## ДЕФОРМИРОВАНИЕ НЕОДНОРОДНО СЖАТОГО КОНСТРУКЦИОННОГО КЕРАМЗИТОБЕТОНА

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

Изложены результаты исследования напряженно-деформированного состояния неоднородно сжатых керамзитобетонных 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 площадок, 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 физи-ко-механических свойств в широком диапазоне изменения прочности. Изучено влияние размеров образцов на прочность и деформации КБ при неоднородном сжатии. Изготовлено и испытано на осевое и внецентренное сжатие 147 геометрически подобных керамзитобетонных образцов - прямоугольных призм с высотой сечения  $h = (60, 40, 20, 10 \text{ и } 5) \text{ см}$ , шириной  $h/3$  и длиной  $l = 3h$  по методике, изложенной в работах [1...3]. В опытах использован конструкционный керамзитобетон 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 образцов на период испытания составлял 9...10 месяцев. При исследовании геометрически подобных коротких керамзитобетонных колонн выдержано полное подобие в технологии изготовления и методике испытания образцов (схеме загрузки, условиях передачи нагрузки и др.).

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

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

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

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

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

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 x 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;  $\bar{\lambda}_B$  – уточненный предельный

коэффициент упругости центрально сжатых колонн из КБ:

$$\bar{\lambda}_B = (62 + R_{B15}) / (111 + 0,45 R_{B15}).$$

Обобщение экспериментальных данных о деформировании одноосно сжатого КБ, содержащихся в литературе, и результатов наших опытов позволило установить характерный для этого напряженного состояния вид функции  $\sigma_B(\epsilon_B)$ . Поскольку из уравнения  $\sigma_B(\epsilon_B)$

обычно исключают  $t, v_N$  (или  $v_\varepsilon$ ), оно для условий кратковременного сжатия должно содержать, как минимум координаты одной точки, принадлежащей фактической кривой (например,  $R_B$  и  $\varepsilon_{BxH}$ ), 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  $\sigma_B = R_B, d\sigma_B/d\varepsilon_B = 0$ , уравнение касательного модуля деформаций при стандартном кратковременном сжатии запишем в виде

$$E_B = d\sigma_B/d\varepsilon_B = E_B(0) [1 - \sigma_B/R_B]^{1 - \bar{\lambda}_B}, \quad (2)$$

где  $E_B(0)$  — начальный модуль упругости. Решением дифференциального уравнения (2) с учетом начальных условий  $\sigma_B = 0$  и  $\varepsilon_B = 0$  для  $\bar{\lambda}_B \neq 1$  получим удобные для применения зависимости

$$\sigma_B(r) = R_B(r) [1 - [1 - \varepsilon_{Bx}(r) / \varepsilon_{BxH}(r)]^{1/\bar{\lambda}_B}], \quad (3)$$

$$\varepsilon_{Bx}(r) = \varepsilon_{BxH}(r) [1 - [1 - \sigma_B(r) / R_B(r)]^{\bar{\lambda}_B}], \quad (4)$$

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

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

$$\sigma_B(r) = R_B(r) / [1 + a R_B(r) [(\varepsilon_{Bx}(r) / \varepsilon_{BxH}(r)) - 1]^2], \quad (5)$$

$$\varepsilon_{Bx}(r) = \varepsilon_{BxH}(r) (1 + \sqrt{(1 - n)/a R_B(r) \eta}), \quad (6)$$

где  $a$  - функция заданной скорости деформаций (для некоторых средних условий, по данным [5], ее можно принять равной 1/55);  $\eta = \sigma_B(r) / R_B(r)$  - относительные уровни напряжений на нисходящей ветви диаграмм.

Полученные диаграммы  $\eta - \varepsilon_B$  одноосно сжатого керамзитобетона представлены на рис. 2, где кривые 1...3 и 1'...3' построены по уравнению (3). Полная диаграмма сжатия для бетонного образца

размерами 180 x 60 x 20 см и  $R_m=28,5$  МПа показана на вставке рис. 2.

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

Неоднородное сжатие вносит существенные изменения в связь между  $\sigma_{вс}$  и  $\epsilon_{вс}$  бетона. Здесь предельные относительные деформации  $\epsilon_{всн}$  наиболее нагруженной грани внецентренно сжатых бетонных колонн значительно больше  $\epsilon_{всц}$  центрально сжатых образцов – близнецов и не являются величиной постоянной для данного вида бетона.

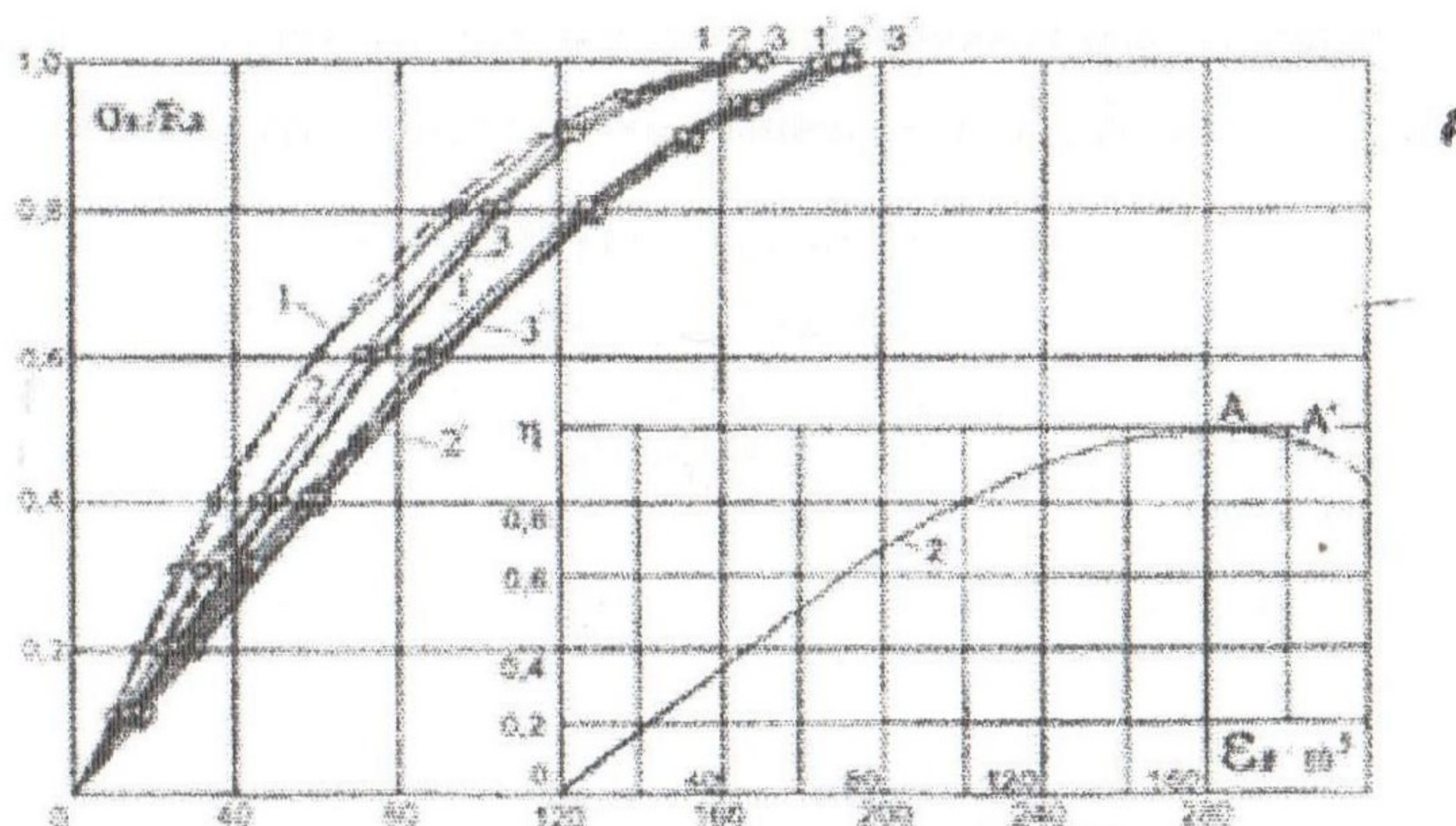


Рис.2. Диаграммы  $\eta - \epsilon_v$  одноосно сжатого керамзитобетона: 1...3 - колонны с прочностью, соответственно,  $R_m=17,0$ ; 28,5 и 36,6 МПа сечением 60 x 20см; 1'...3' - то же сечением 5 x 5 см

Значения  $\epsilon_{всн}$  зависят от высоты сечения ( $h$ ) элемента, относительного эксцентриситета ( $e_0 / h$ ) и прочности керамзитобетона  $R_B$  ( $\gamma$ ). Функция  $\epsilon_{всн}(e_0, h, R_B)$  описывается выражением

$$\epsilon_{всн} = \epsilon_{всц}(\gamma) \gamma_\epsilon \quad (7)$$

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

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

Опытные значения  $\varepsilon_{vxeи}$  хорошо согласуются с вычисленными по формулам (7 и 8). Для оценки связи  $\varepsilon_{vxeи}$  и  $(e_0, h, R_b)$  в нелинейной зависимости (7) определено множественное корреляционное отношение  $\eta_0 = 0,867$ . Средняя относительная ошибка аппроксимаций  $\varepsilon$  для выражении (7 и 8) составляет 3,8%. 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 керамзитобетона отличается от центрального сжатия. 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  $\sigma_b$  и  $\varepsilon_b$  осевого сжатия,

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

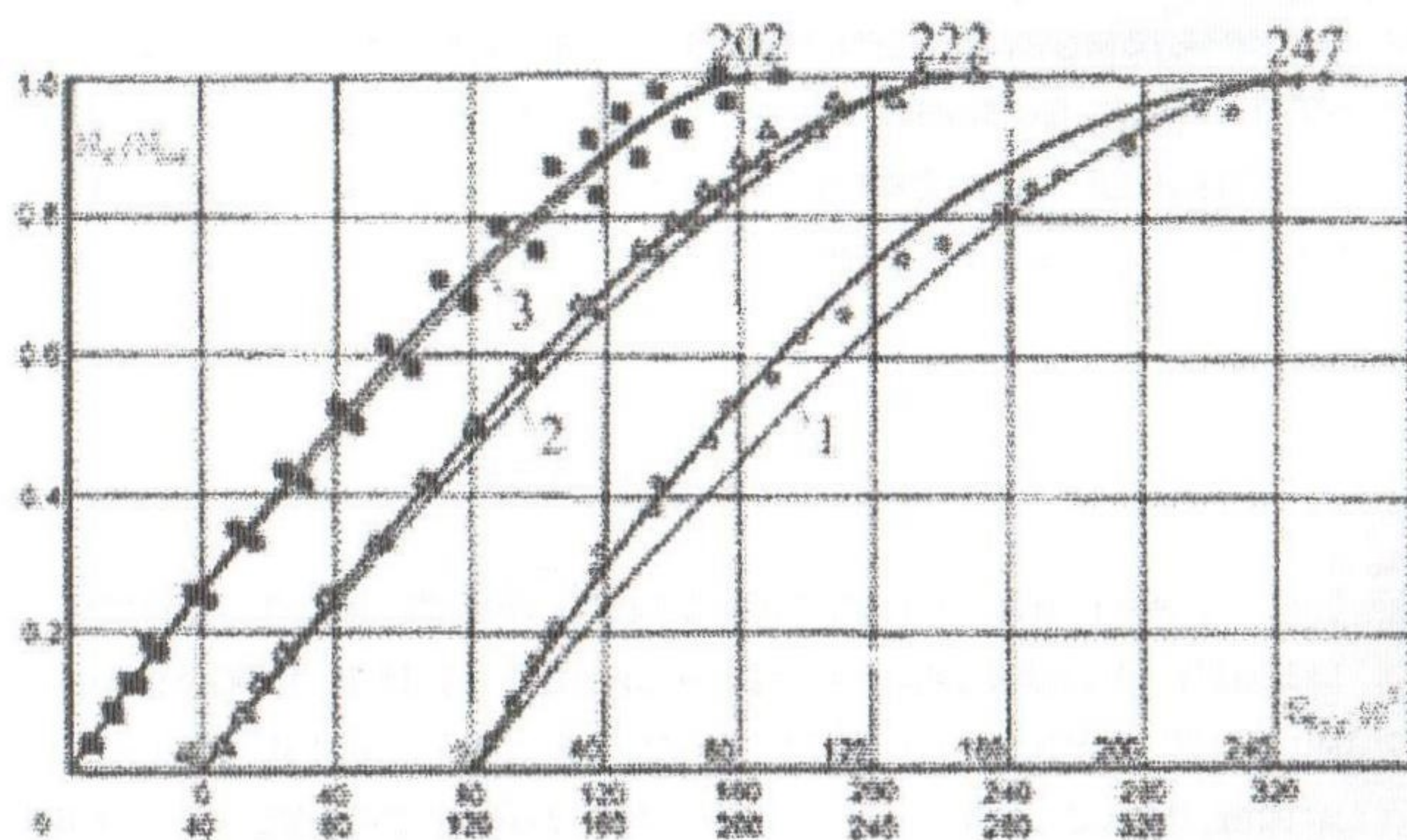


Рис. 3. Диаграммы  $N_e / N_{ue} - \varepsilon_{vxe}$  керамзитобетона наиболее нагруженной грани внецентренно сжатых колонн сечением 60x20 см; для  $e_0 = h/6$  кубиковая прочность керамзитобетона колонн серий: 1 - 17,0; 2 - 28,5; 3 - 36,6 МПа

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

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

где  $N_{u(\Gamma)} = R_B(\Gamma) \cdot A_B$ , кН;  $\gamma_R$  - 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

1. 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.
2. Обоснован выбор феноменологической зависимости для описания диаграмм сжатия бетона при кратковременном действии центрально и внецентренно приложенной нагрузки.
3. Установлено, что предельная деформация при внецентренном сжатии - величина переменная, зависящая от эксцентриситета

приложения нагрузки, высоты сечения образца и других факторов.

4. Полученные количественные оценки кратковременной прочности и деформаций центрально и внецентренно сжатых элементов из керамзитобетона 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. 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 / Спецвыпуск "Актуальные проблемы строительства и архитекту-ры", 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. Стрво 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.