

прочности нормальных сечений. – Полтава: Полт. НТУ, 2002. – 183 с.

10.Роговий С.І. Посібник із розрахунку міцності нормальних перерізів елементів залізобетонних конструкцій на основі нелінійної деформаційної розрахункової моделі. – Полтава: ПолтНТУ, 2004. – 40 с.

*Отримано 15.10.2004*

УДК 624.012.4 - 183.2 : 620.178.6

Д.А.ТАХТАЙ, В.И.ВЕРЕТЕННИКОВ, канд. техн. наук,

А.А.БАРМОТИН, канд. техн. наук

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, г.Макеевка*

## **ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ БЕТОНА ПРИ ВНЕЦЕНТРОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ**

Приводятся результаты влияния циклического нагружения на прочность и деформативность бетона при осевом и внецентренном сжатии, предложения по теоретическому описанию напряженно-деформированного состояния внецентренно-сжатых бетонных элементов подвергнутых циклическому сжатию.

Напряженно-деформированное состояние сечений бетонных и железобетонных элементов при малоцикловом нагружении изучены Е.М.Бабичем [1], А.Я.Барашиковым [2], Е.И.Дмитрюковой [5] и др.

Циклическое нагружение изгибаемых и внецентренно-сжатых элементов приводит к возникновению существенной неоднородности бетона по высоте сечения элемента из-за различия в уровнях нагружения волокон сжатой и растянутой зон. Рекомендации норм по расчету прочности, деформаций и трещиностойкости бетонных и железобетонных элементов учитывают влияние этого фактора обобщенно, что объясняется в основном недостаточной изученностью физико-механических свойств бетона и напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов при действии циклических нагрузок.

Значительная часть накопленных экспериментальных данных была получена при осевом и внецентренном нагружении образцов. В проводимых экспериментальных исследованиях наибольшее внимание уделялось несущей способности и деформациям элемента в целом. Напряженно-деформированное состояние бетона сжатой зоны устанавливали исходя из опытов на осевое малоцикловое нагружение.

Целью настоящей работы является изучение влияния способов циклического нагружения на диаграмму деформирования бетона при неоднородном сжатии.

Для моделирования работы сжатой зоны железобетонных элементов, подвергающихся циклическому действию нагрузки, нами была ис-

пользована специальная экспериментальная установка, позволяющая выдерживать или регулировать распределение деформаций по сечению в процессе нагружения образцов [3]. Испытывались образцы с прямоугольной и ромбовидной формой поперечного сечения. Прямоугольные образцы-призмы были приняты размером 0,1×0,1×0,4 м, 0,15×0,15×0,6 м, 0,5×0,3×1,4 м. Диагонали ромбовидных образцов составляли 0,142 и 0,212 м.

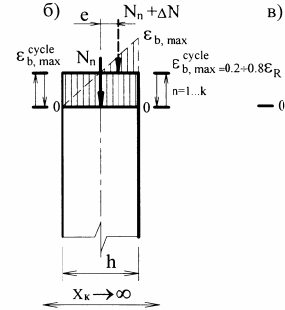
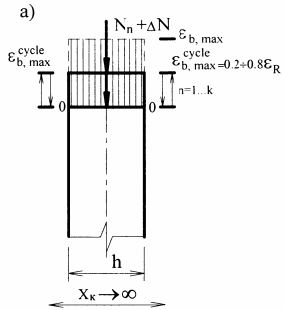
Образцы были разделены на две группы. Первая группа испытывалась на действие однократно приложенной ступенчато-возрастающей нагрузкой по методике [4]. Испытание второй группы образцов проводилось в два этапа. На первом этапе образцы подвергались циклическому воздействию нагрузки, а на втором доводились до разрушения.

Нагружение образцов циклической нагрузкой осуществлялось по трем схемам. В первом случае условная высота сжатого бетона при малоцикловом нагружении составляла  $X_{\text{мал}} \rightarrow \infty$ , т.е. реализовывался случай осевого нагружения (рис.1, а, б), во втором случае  $X_{\text{мал}} = h$ , что соответствовало треугольному распределению деформаций по высоте сечения элемента (рис.1, в), в третьем –  $X_{\text{мал}} = 1,5h$ , т.е. выдерживалась трапециевидная эпюра деформаций (рис.1, г, д).

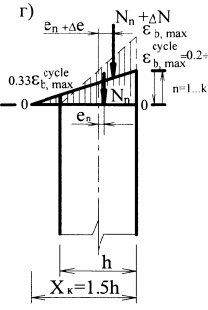
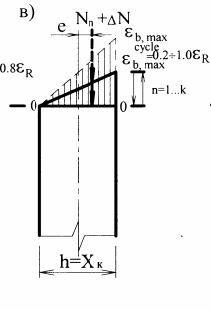
Нагружение образцов проводилось ступенчато-возрастающей нагрузкой до заданного значения деформаций  $\mathcal{E}_{b,\text{max}}^{\text{cycle}}$  в крайнем, наиболее нагруженном волокне, которые были приняты равными 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 и 1,0  $\epsilon_{bR}$  (где  $\epsilon_{bR}$  – деформация при осевом сжатии эталонных образцов, соответствующая  $R_b$ ). Затем проводилась полная разгрузка образца и замерялись остаточные продольные деформации. Последующие циклы нагружения - разгрузки проводились по принятой схеме до значения внешней сжимающей силы достигнутой на первом этапе. Граничное число циклов  $n$  назначалось из условия наступления стабилизации деформаций. Стабилизация считалась наступившей, если прирост деформаций на последующем цикле нагружения составлял не больше 2-3% от деформаций предыдущего цикла нагружения.

Исследования показали, что при циклическом нагружении основная часть пластических деформаций бетона выбирается в первом цикле. Для всех уровней циклического нагружения участки разгрузки диаграммы деформирования имеют кривизну обратную участку загрузки. С увеличением количества циклов участок разгрузки постепенно выпрямляется. Причинами такого поведения бетона является, по видимому, ряд факторов, главные из которых: уплотнение структуры

I схема  
нагрузки



II схема  
нагрузки



III схема  
нагрузки

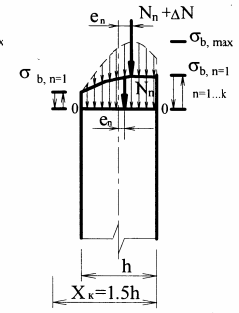
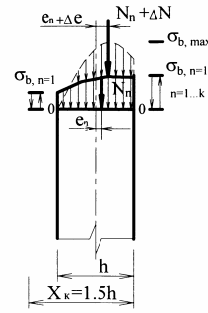
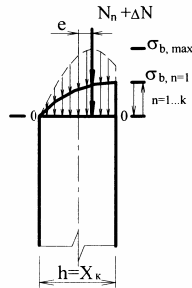
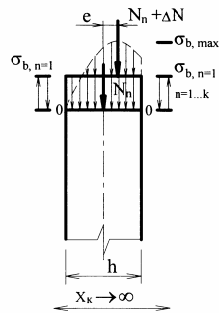
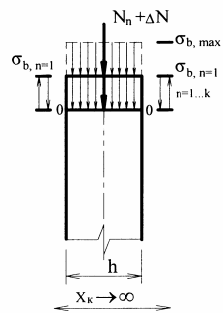
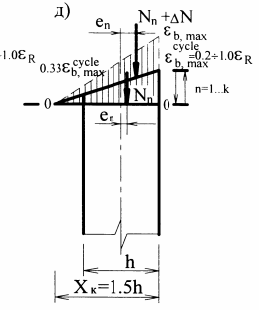


Рис.1 – Схемы нагружения образцов:

— - деформации и напряжения (нижние рисунки) при циклическом нагружении;  
 - - - - - то же, при нагружении до разрушения.

бетона, появление микротрещин и возникновение внутренних напряжений.

Под влиянием этих факторов в начале диаграммы деформирования бетона секущий модуль деформаций снижается, а затем под действием сжимающих напряжений вследствие уплотнения структуры бетона происходит его увеличение (рис.2).

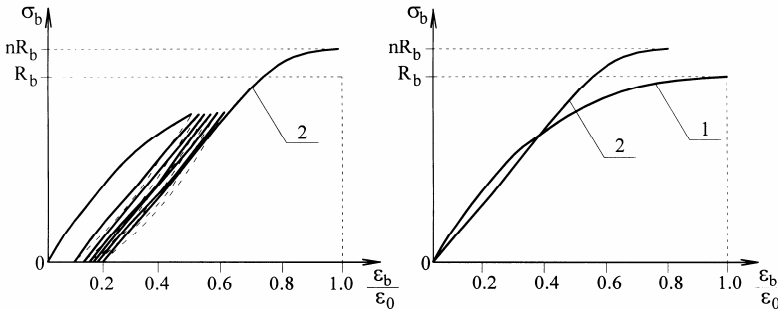


Рис.2 – Влияние малоциклового нагружения на прочность и деформативность бетона при осевом сжатии:

1 – диаграмма деформирования эталонного образца;

2 – диаграмма деформирования образца, подвергнутого циклическому нагружению.

Для однородно сжатых образцов с увеличением уровня циклического нагружения до  $0,8 R_b$  наблюдается прирост прочности, который для уровней нагружения  $0,4; 0,6; 0,8 R_b$  составил  $5, 11, 17 \%$  соответственно. Коэффициент  $\gamma_{R,цикл}$  (рис.3), учитывающий повышение прочности бетона можно выразить в этом случае через уровень напряжений  $\eta_b$ :

$$\gamma_b = (0,97 - 1,1\eta_b)^{-\frac{1}{15,44}}, \quad \eta_b \leq 0,8; \quad (1)$$

$$\gamma_b = (-3,64 + 4,75\eta_b)^{-\frac{1}{11,85}}, \quad \eta_b > 0,8; \quad (2)$$

$$\eta_b = \frac{\sigma_b}{R_b}. \quad (3)$$

Для однородно сжатых образцов деформации в вершине диаграммы последнего цикла нагружения при уровне нагружения  $0,8R_b$  на  $22\%$  меньше аналогичных деформаций эталонных образцов. При этом полные деформации, с учетом остаточных на каждом этапе, для каж-

дого уровня нагружения были близки к деформациям образцов, испытанных при однократном действии нагрузки.

Коэффициент  $\gamma_{\varepsilon, \text{цикл}}$  (рис.4), учитывающий уменьшение деформаций в вершине диаграммы  $\sigma$ - $\varepsilon$  бетона после циклического нагружения, выражается зависимостями:

$$\gamma_{\varepsilon, \text{цикл}} = (0,994 + 0,263\eta_b)^{-1,3}, \quad \eta_b \leq 0,9; \quad (4)$$

$$\gamma_{\varepsilon, \text{цикл}} = (1,56 - 0,56\eta_b)^{-5}, \quad \eta_b > 0,9. \quad (5)$$

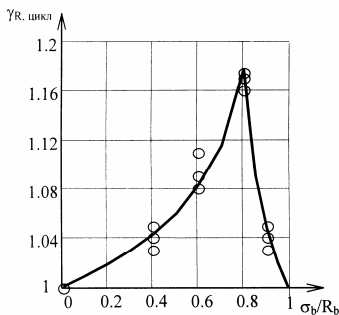


Рис.3 – Зависимость коэффициента  $\gamma_{R, \text{цикл}}$  от уровня циклического нагружения:

○ – опытные данные;  
— – теоретические значения по (1)-(3).

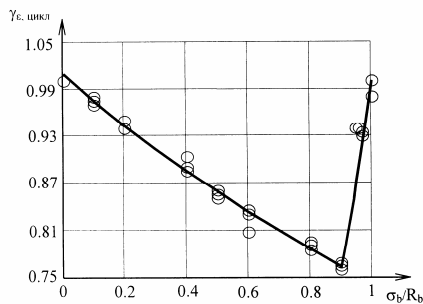


Рис.4 – Зависимость коэффициента  $\gamma_{\varepsilon, \text{цикл}}$  от уровня циклического нагружения:

○ – опытные данные;  
— – теоретические значения по (3)-(5).

Модуль упругости бетона с увеличением уровня нагружения снижается до 24%. Наиболее интенсивное снижение наблюдается начиная с уровня циклического нагружения равного  $0,6R_b$ .

Прочность и деформации наиболее нагруженного волокна после циклического нагружения во всех случаях также были больше по сравнению с образцами, испытанными однократно приложенной нагрузкой.

Прирост прочности и деформаций зависел от уровня нагружения и максимальной величины кривизны элемента при циклическом внецентренном нагружении, которое соответствовало первому циклу нагружения:

$$\left(\frac{1}{r}\right)_{\text{цикл, max}} = \frac{\varepsilon_{b, \text{max}}^{\text{cycle}}}{X_{\text{цикл}}}, \quad (6)$$

где  $\varepsilon_{b,\max}^{cycle}$  – максимальная деформация крайнего наиболее сжатого волокна бетона при циклических нагружениях (в данном случае  $\varepsilon_{b,\max}$  соответствует первому циклу нагружения).

Опытами установлено, что при одинаковых схемах и уровнях нагружения с уменьшением высоты сечения с 0,5 до 0,1 м соотношение  $N_{цикл}^{внец} / N_{кратк}^{внец}$  возрастает до 11% ( $N_{цикл}^{внец}$ ,  $N_{кратк}^{внец}$  – величины разрушающих нагрузок образцов после циклического нагружения и при однократном нагружении соответственно). Наибольший прирост  $N_{цикл}^{внец} / N_{кратк}^{внец}$  наблюдался при уровне деформаций в крайнем наиболее нагруженном волокне, равный  $0,6 \pm 0,65 \varepsilon_{bR}$ . Деформации последнего цикла нагружения в стадии, близкой к разрушению, были близки к деформациям образцов, испытанных при однократном действии нагрузки. Однако полные деформации образцов (с учетом остаточных на каждом этапе нагружения) в зависимости от уровня циклического нагружения возрастали до 21%.

Для теоретического анализа напряженно-деформированного состояния, нормальное сечение образцов вводили в расчет в дискретной форме – в виде набора  $i$ -го числа элементарных участков бетона с площадками  $A_{bi}$ , в пределах которых напряжения в бетоне  $\sigma_{bi}$  в процессе численного интегрирования считались равномерно распределенными. Для описания НДС неравномерно сжатых бетонных элементов использовалось аналитическое представление диаграммы  $\sigma_b - \varepsilon_b$  бетона, предложенное Н.И.Карпенко [6].

Связь между напряжениями и деформациями на ветви нагрузки для  $i$ -го цикла представляется в виде:

$$\vec{\varepsilon}_{bi} = \frac{\vec{\sigma}_{bi}}{E_b^0 \vec{v}_{bi}} + \vec{\varepsilon}_{bi-1}, \quad (7)$$

где  $\vec{v}_{bi}$  – коэффициент изменения секущего модуля деформации бетона на ветви нагрузки рассматриваемого цикла;  $\vec{\varepsilon}_{bi-1}$  – остаточные деформации предшествующего цикла ( $i-1$ ).

Функция  $\vec{v}_{bi}$  с учетом влияния многократно повторяющейся нагрузки выражается в виде:

$$\vec{V}_{bi} = \widehat{V}_{bi} + (\vec{V}_{0i} - \widehat{V}_{bi}) \sqrt{1 - \omega_{1i} \vec{\eta}_i - \omega_{2i} \vec{\eta}_i^2}; \quad (8)$$

$$\widehat{V}_{bi} = \frac{\vec{\sigma}_{bi}}{E_b^0 (\varepsilon_R - \vec{\varepsilon}_{bi-1})}, \quad (9)$$

где  $\vec{\eta}_i = \frac{\vec{\sigma}_{bi}}{\vec{\sigma}_{bi}}$  – уровень напряжений на ветви нагрузки;  $\vec{\sigma}_{bi}$  – напряжения в вершине диаграммы;

$$\vec{\sigma}_{bi} \approx \vec{\sigma}_b \left( 1 + 0,1 \sum_{i=1}^n \alpha_i \right); \quad (10)$$

$$\alpha_i = \sin[0,16 \cdot k_i \cdot \pi (\vec{\eta} - 0,3)]; \quad (11)$$

$$k_i = 1/i, \quad \text{если} \quad 0,3 < \vec{\eta} < 0,9. \quad (12)$$

На восходящем участке диаграммы:

$$\omega_{1i} = 2 - 2,5 \widehat{V}_{bi}; \quad (13)$$

$$\omega_{2i} = 1 - \omega_{1i}. \quad (14)$$

Функцию изменения кривизны диаграммы на начальном ее участке ( $\vec{V}_{0i}$ ) предложено определять по формуле

$$\vec{V}_{0i} \approx 1 + \frac{(1,5 \vec{\eta}_i - \vec{\eta}_{i-1}) I_{i-1}}{5(1 + I_{i-1})}. \quad (15)$$

Здесь  $\vec{\eta}_{i-1}$  – уровень напряжений в вершине предшествовавшего цикла;  $I_{i-1}$  – функция влияния предшествовавших циклов.

$$I_{i-1} = \left( S_{i-1} \vec{\eta}_{i-1}^2 - \vec{\eta}_{i-2}^2 \right)^{0,5}. \quad (16)$$

Здесь

$$S_{i-1} = \frac{k(i-1) + 3}{k(i-1) + 2}, \quad (17)$$

где  $k(i-1)$  – номер  $k$ , соответствующий  $(i-1)$ .

На нисходящем участке  $\vec{V}_{0i}$  определяется по формуле

$$\vec{V}_{0i} \approx 2,05 \widehat{V}_{bi}, \quad (18)$$

а другие параметры – по формулам (7), (8), (13), (14).

Для описания внецентренно сжатых бетонных элементов удобно

использовать связь между напряжениями и деформациями, предложенную в работе [7]:

$$\sigma_{bi} = E_b^0 \nu_b \cdot (\varepsilon_{bi} - \varepsilon_{bi-1}), \quad (19)$$

где  $\nu_b$  – коэффициент изменения секущего модуля деформаций, определяемый по формуле

$$\widehat{\nu}_{bi} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4a \cdot c}}{2 \cdot a}. \quad (20)$$

Параметры, входящие в (20), определялись по формулам:

$$a = \widehat{\nu}_{bi}^2 + \omega_2 \cdot \eta^2 (\nu_{0i} - \widehat{\nu}_{bi})^2; \quad (21)$$

$$b = -[2 \cdot \widehat{\nu}_{bi}^3 - \widehat{\nu}_{bi} \cdot e_1 \cdot \eta (\nu_{0i} - \widehat{\nu}_{bi})^2]; \quad (22)$$

$$c = -\widehat{\nu}_{bi}^2 (\nu_{0i}^2 - 2 \cdot \nu_{0i} \cdot \widehat{\nu}_{bi}); \quad (23)$$

$$\omega_1 = \begin{cases} 2 - 2,5\widehat{\nu}_{bi} & \text{при } \eta \leq 1, \\ (1,4 \cdot \widehat{\nu}_{bi} - 0,138) & \text{при } \eta > 1; \end{cases} \quad (24)$$

$$\omega_2 = 1 - \omega_1; \quad (25)$$

$$\widehat{\nu}_{bi} = \frac{R_b}{E_b \cdot \varepsilon_0}; \quad (26)$$

$$\eta = \varepsilon_{bi} / \varepsilon_R. \quad (27)$$

Тогда функцию  $\vec{\nu}_{0i}$ , предложенную Н.И. Карпенко, можно записать через уровень деформаций в виде:

$$\vec{\eta}_t = a + b \left( \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_R} \right) + c \left( \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_R} \right)^2 + d \left( \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_R} \right)^3 + e \left( \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_R} \right)^4, \quad (28)$$

где  $a=5,3 \cdot 10^{-6}$ ;  $b=180,315 \cdot 10^{-2}$ ;  $c=-210,345 \cdot 10^{-3}$ ;  $d=-994,775 \cdot 10^{-3}$ ;  $e=401,562 \cdot 10^{-3}$ .

$$\nu_{0i} = \begin{cases} 1 + \frac{(1,5\vec{\eta}_i - \vec{\eta}_{i-1})I_{i-1}}{5(1 + I_{i-1})} & \text{при } \eta \leq 1, \\ 2,05\widehat{\nu}_{bi} & \text{при } \eta > 1. \end{cases} \quad (29)$$

При сопоставлении опытных и теоретических данных наблюдается их расхождение на восходящем участке диаграммы (рис.5), следовательно, необходимо внести корректировку.



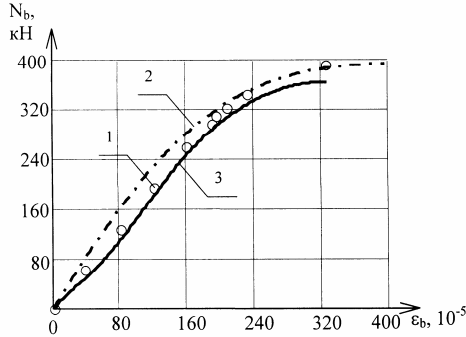


Рис.5 – Сопоставление опытных и теоретических данных:  
 1 – опытные данные; 2 – по предложениям Н.И.Карпенко;  
 3 – по предлагаемому варианту.

Для нашего варианта

$$\bar{\eta}_t = \left( a_n + b_n \left( \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_R} \right) + c_n \left( \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_R} \right)^2 + d_n \left( \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_R} \right)^3 + e_n \left( \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_R} \right)^4 + f_n \left( \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_R} \right)^5 \right) - 1, \quad (30)$$

где  $a_n = -165,746 \cdot 10^{-1}$ ;  $b_n = 649,267 \cdot 10^{-1}$ ;  $c_n = -956,942 \cdot 10^{-1}$ ;  
 $d_n = 692,339 \cdot 10^{-1}$ ;  $e_n = -241,363 \cdot 10^{-1}$ ;  $f_n = 3,244$ .

С учетом всех корректировок формула для определения  $V_{0i}$  примет вид:

$$V_{0i} = \begin{cases} 1 + \frac{(2,75 \cdot \bar{\eta}_t - \bar{\eta}_t - 1,65) I_{i-1}}{1,05(1 + I_{i-1})} & \text{при } \eta \leq 1, \\ 2,05 \bar{v}_{bi} & \text{при } \eta > 1. \end{cases} \quad (31)$$

Сопоставление опытных и теоретических данных показало, что для всех образцов, испытанных после циклического нагружения, опытное значение деформаций, положение и величина равнодействующей напряжений в бетоне были близки к теоретическим до тех пор, пока полные деформации (с учетом остаточных на каждом этапе) краевого волокна были меньше, чем предельная сжимаемость  $\varepsilon_{bR}$  бетона при осевом сжатии. Таким образом, возникла необходимость корректировки нисходящей ветви диаграммы деформирования бетона с учетом предыстории циклического нагружения.

На нисходящем участке параметры диаграммы деформирования неоднородно сжатого бетона корректировались согласно предложению [3] за счет замены в (24) 1,4 на 1,95 и введения коэффициента  $K_h$ ,

зависящего от условной высоты сжатого бетона:

$$\omega_1 = (1,95 \cdot \bar{\nu}_{bi} - 0,138)K_h; \quad (32)$$

$$K_h = \frac{a_1 + b_1 \left(10^2 \cdot X_k\right)^{2,825}}{c_1 + \left(10^2 \cdot X\right)^{2,825}}, \quad (33)$$

где  $a_1=-443,484$ ;  $b_1=1,558$ ;  $c_1=18,376$ ;  $X_k$ , в м.

В результате корректировок диаграммы деформирования бетона, мы получили хорошую сходимость опытных и теоретических значений при испытании по первой и второй схемам нагружения, а при сопоставлении третьей схемы получили неудовлетворительную сходимость опытных и теоретических данных.

Анализ полученных данных показал, что обобщающим параметром для корректировки диаграммы  $\sigma_b - \varepsilon_b$  бетона является значение кривизны элемента при циклическом внецентренном нагружении.

$$K_h^{малоц} = K_h - B \cdot \left(\frac{1}{r}\right)_{цикл, \max} + C \cdot \left(\frac{1}{r}\right)_{цикл, \max}^2, \quad (34)$$

где

$$B = \frac{-2,31 + 0,302 X_{разр}}{1 + 0,849 X_{разр} - 8,196 \cdot 10^{-5} X_{разр}^2}; \quad (35)$$

$$C = -1,119 \cdot 10^{-2} + 1,316 \cdot 10^{-3} X_{разр} + 9,359 \cdot 10^{-7} X_{разр}^2, \quad (36)$$

где  $X_{разр}$  – высота сжатого бетона на стадии близкой к разрушению,  $m \times 10^2$ .

Значение коэффициента  $K_h$  в зависимости от высоты сжатого бетона и кривизны элемента при циклическом нагружении представлены на рис.6.

Сравнение опытных и теоретических данных прочности и деформативности бетонных сжатых образцов приведено в таблице.

Теоретические данные, полученные с использованием формул Н.И.Карпенко с учетом изменения прочности, предельной сжимаемости и кривизны диаграммы на ее начальном участке после циклического нагружения, завышают прочность образцов до 8% и деформаций до 22%, причем завышение прочности и деформативности растет с увеличением размеров сечения элемента. Данные, полученные с учетом корректировки, показали лучшую сходимость с опытными значения-

ми, расхождение по прочности и деформативности составляют  $\pm 2$  и  $\pm 15\%$  соответственно.

Сравнение опытных и теоретических данных

№ п/п	Размер образца, м	Условная высота сжатого бетона		Группа образцов	Уровень нагружения $\eta = \frac{\epsilon_b}{\epsilon_{bR}}$	Опытные данные		Теоретические данные			
		$X_{\text{искл}}$ м	$X_{\text{вкл}}$ м			N, кН	$\epsilon, 10^{-5}$	по предложению Н.И.Карпенко		с учетом корректировки	
								N, кН	$\epsilon, 10^{-5}$	N, кН	$\epsilon, 10^{-5}$
1	0,1x0,1x0,4	∞	∞	I	0,172	272,13	199	271,6	199	272,2	193
2					0,404	299,7	178	278,4	178	298,2	175
3					0,467	317,5	176	279,7	176	306,7	171
4		∞	0,1	II	0,2	263,1	358	273,4	366	264,3	334
5					0,379	264,5	302	277,8	366	264,4	295
6					0,6	272,3	280	271,2	308	269,3	260
7		0,5	0,1	II	0,2	270,1	300	274,6	379	268,8	344
8					0,4	276,4	321	272,4	334	271,1	313
9					0,2	274,0	339	274,8	380	270,2	359
10		0,212	0,1	II	0,4	276,3	332	272,5	343	274,5	342
11					0,6	287,1	320	271,4	319	284,9	333
12					0,345	290,6	325	276	393	274,3	360
13		0,15	0,1	II	0,533	295,6	360	274	377	282,0	355
14					0,6	290,2	360	263	310	286,9	353
15					0,254	286,25	384	275,2	384	273,3	388
16		0,1	0,1	II	0,4	289,4	363	273,8	374	277,3	391
17					0,693	303,13	397	261,0	286	286,1	393
18					0,2	465,7	243	447,7	236	463,6	231
19	0,15x0,15x0,6	∞	∞	III	0,436	506,25	219	459,7	219	504,5	209
20					0,6	463,8	207	464,0	202	462,3	201
21					0,2	351,2	410	358,5	419	347,9	364
22		∞	0,15	IV	0,485	393,1	325	359,2	362	357,7	335
23					0,6	331,2	322	375,4	422	326,5	309
24					0,2	351,7	412	358,4	429	349,3	376
25		0,5	0,15	III	0,4	362,1	377	363,4	393	359,5	344
26					0,5	369,8	341	363,0	382	369,1	335
27					0,2	352,4	431	357,2	442	349,9	399
28		0,212	0,15	III	0,4	361,2	405	358,9	413	359,6	383
29					0,6	368,9	373	360,1	397	367,6	385
30					0,2	351,1	440	358,0	450	349,8	415
31		0,15	0,15	III	0,4	359,7	405	357,8	433	357,3	400
32					0,6	364,3	378	359,4	424	362,1	385
33					0,2	5493,2	202	5330	196	5478	195
34		∞	∞	V	0,4	5810,1	183	5423	179	5803	179
35					0,6	5597	174	5507	170	5588	170
36					0,2	3927	352	4139	376	3905	291
37	0,5	0,5	V	0,4	3906	311	4125	359	3898	263	
38				0,6	3951	284	4136	352	3937	245	

Примечание. В таблице приведены усредненные значения по образцам-близнецам:  
 $I - R_b=27,0 \text{ МПа}; E_b=27,7 \cdot 10^3 \text{ МПа}; \epsilon_{bR}=215 \cdot 10^{-5};$

II –  $R_b=36,3$  МПа;  $E_b=28,1 \cdot 10^3$  МПа;  $\epsilon_R=225 \cdot 10^{-5}$ ;  
 III –  $R_b=19,7$  МПа;  $E_b=18,71 \cdot 10^3$  МПа;  $\epsilon_R=264 \cdot 10^{-5}$ ;  
 IV –  $R_b=19,7$  МПа;  $E_b=19,8 \cdot 10^3$  МПа;  $\epsilon_R=264 \cdot 10^{-5}$ ;  
 V –  $R_b=35,1$  МПа;  $E_b=34,7 \cdot 10^3$  МПа;  $\epsilon_R=220 \cdot 10^{-5}$ ;  
 VI –  $R_b=28,8$  МПа;  $E_b=29,3 \cdot 10^3$  МПа;  $\epsilon_R=222 \cdot 10^{-5}$ .

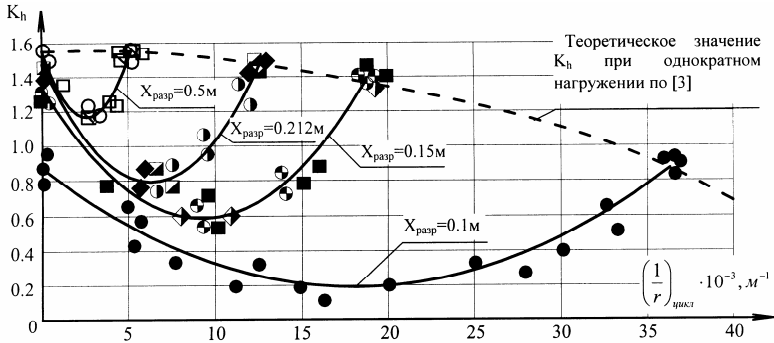


Рис.6 – Зависимость коэффициента  $K_h$  от высоты сжатого бетона  $X_{раз}$  и кривизны элемента при циклическом внецентренном нагружении:

- ○ ◐ ◑ - образцы сечением  $0,1 \times 0,1$  м, испытанные с условной или фактической высотой сжатого бетона  $0,1$  м,  $0,15$  м,  $0,212$  м,  $0,5$  м
- ▨ □ - образцы сечением  $0,15 \times 0,15$  м, испытанные с условной или фактической высотой сжатого бетона  $0,15$  м,  $0,212$  м,  $0,5$  м
- ▣ - образцы сечением  $0,5 \times 0,3$  м, испытанные с высотой сжатого бетона  $0,5$  м
- ◊ ◆ - ромбовидные образцы с размерами диагоналей  $0,141$  м и  $0,212$  м, испытанные с высотой сжатого бетона  $0,141$  м и  $0,212$  м

Таким образом, для однородно сжатых образцов при уровне циклического нагружения  $0,4R_b$ ,  $0,6R_b$  и  $0,8R_b$  наблюдается прирост прочности, который достигает 5, 11 и 17% соответственно. Деформации в вершине диаграммы последнего цикла нагружения были на 8, 17 и 26% меньше аналогичных деформаций эталонных образцов. При этом полные деформации, с учетом остаточных были близки к деформациям образцов испытанных при однократном действии нагрузки. Начальный модуль упругих деформаций бетона снижается до 22%.

Для неоднородно сжатых образцов при одинаковых схемах и уровнях нагружения, с уменьшением высоты сечения с  $0,5$  до  $0,1$  м соотношение  $N_{цикл}^{внец} / N_{кратк}^{внец}$  возрастает до 11%. Наибольший прирост  $N_{цикл}^{внец} / N_{кратк}^{внец}$  наблюдался при уровне деформаций в крайнем наиболее нагруженном волокне, равный  $0,6 \div 0,65 \epsilon_{bR}$ . Деформативность

наиболее нагруженного краевого волокна возрастает с уровнем нагружения до 21%.

Равномерное циклическое нагружение бетона не оказывает дополнительного влияния на перераспределение напряжений по высоте сечения элемента при его последующем неравномерном нагружении.

Для теоретического описания напряженно-деформированного состояния неравномерного сжатия после циклического нагружения бетона, может использоваться метод, применяемый для однократного кратковременного нагружения с корректировкой прочности, предельной сжимаемости, кривизны диаграммы на начальном участке, а также положения нисходящей ветви.

Выполненные исследования необходимы для уточнения расчета напряженно-деформированного состояния бетонных и железобетонных элементов при циклических нагружениях.

1.Бабич Е.М. Влияние длительных и малоцикловых нагружений на механические свойства бетонов и работу железобетонных элементов: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Одесса, 1995. – 43 с.

2.Барашиков А.Я., Шевченко Б.Н., Валовой А.И. Малоцикловая усталость бетона при сжатии // Бетон и железобетон. – 1985. – №4. – С.27-28.

3.Веретенников В.И., Бармотин А.А. О влиянии размеров и формы сечения элементов на диаграмму деформирования бетона при внецентренном сжатии // Бетон и железобетон. – 2000. – №5. – С.27-31.

4.ГОСТ 24452-80. Бетоны. Методы определения призмной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона. – М.: Изд-во стандартов, 1980.

5.Дмитрюкова Е.И. Трещиностойкость и деформативность изгибаемых предварительно-напряженных элементов при повторных многократных и длительных нагрузках: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: НИИЖБ, 1973. – 19 с.

6.Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. – М., Стройиздат: 1996. – С.116-121.

7.Карпенко Н.И., Мухамедиев Т.А., Сапожников М.А. К построению методики расчета стержневых элементов на основе диаграмм деформирования материалов // Совершенствование методов расчета статически неопределимых железобетонных конструкций. – М., 1987. – С.4-25.

*Получено 24.11.2004*

УДК 624.012.45

А.Н.СИРОМЕНКО, А.Ю.КУЛАКОВ

*Харьковская национальная академия городского хозяйства*

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ  
ПЛИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
ПРИ ТЕМПЕРАТУРНО-УСАДОЧНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

Приводятся результаты натуральных исследований напряженно-деформирован-