

МЕХАНИКА ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ БЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Кобринец В.М., проф., Твардовский И.А., доц., Заволока Ю.В., доц.

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

Внекентренное сжатие это частный случай продольного изгиба. Использовать методику сопромата с переносом силы в центр тяжести сечения и приложить момент $M = P \cdot e$ можно на первой стадии загружения, когда бетон работает как линейно упругое тело. При уровне напряжений $\eta_\sigma > 0,3$ бетон проявляет нелинейное деформирование, поэтому нужно применять механику продольного изгиба. Силу надо учитывать там, где она прикладывается, так как принцип наложения уже не работает. В механике продольного изгиба две оси являются расчетными. Относительно оси стержня определяется выгиб, а напряженное состояние относительно нейтральной оси. При внекентренном сжатии оси остаются прямыми. При этом необходимо знать тип эксцентризитета большой или малый. Чтобы сопоставить его нужно знать граничное значение эксцентризитета, это расстояние от центра тяжести эпюры напряжений до оси стержня, или бетонного элемента. Граничному значению e^{sp} нужно задать граничное расположение нейтральной оси. При этом эпюра напряжений будет однозначной, а нейтральная ось будет располагаться на контуре или касаться контура сечения. Для сечений с двумя осями симметрии, например для прямоугольника сечением $b \times h$, $C_{ho}^{sp} = \frac{h}{2}$, для двутавра высотой h – $C_{ho}^{sp} = \frac{h}{2}$, для круга радиуса r – $C_{ho}^{sp} = r$.

Для упругого материала или бетона на первой стадии загружения расстояние C_{ho} определяется по формуле

$$C_{ho} = \frac{y_z}{A[e + f(x) + e_0 + a_0(x)]}. \quad (1)$$

Здесь e - эксцентризитет, $f(x)$ - выгиб стержня или выпучивание, как говорил Тимошенко С.П., e_0 - случайный эксцентризитет, $a_0(x)$ - начальная погибь.

Для внецентренного сжатия $f(x)$ пренебрегаем. Если не учитывать несовершенства тогда

$$C_{ho} = \frac{I_z}{A \cdot e}. \quad (2)$$

По (2) можно определить e^{sp} , если C_{ho}^{sp} известно,

$$e^{sp} = \frac{I_z}{A \cdot C_{ho}^{sp}}. \quad (3)$$

Для прямоугольника $e^{sp} = \frac{bh^3 \cdot 2}{12 \cdot h} = \frac{h}{6}$ (4), для круга

$$e^{sp} = \frac{\pi \cdot r^4}{\pi \cdot r^2 \cdot r} = r.$$

У В.Н. Байкова в общем курсе по железобетонным конструкциям [1] есть понятие относительно большой эксцентрикитет, и относительно малый. Но и в том и другом случае напряжения получаются разнозначные. В ДБН В.2.6.-98:2009. говорится о том, что эпюры напряжений в зависимости от эксцентрикитета могут быть однозначные или двузначные. А какая зависимость между эксцентрикитетами в ДБН не обсуждается. Поэтому e^{sp} это критерий. Если $e \leq e^{sp}$ это малый эксцентрикитет. При этом эпюра напряжений однозначная, а нейтральная ось выходит за пределы сечения.

Если $e \geq e^{sp}$, нейтральная ось удаляется от оси стержня на значительное расстояние. При $e_0 = 0$ $C_{ho} \rightarrow \infty$, это признак центрального сжатия.

Если $e > e^{sp}$ это большой эксцентрикитет. Нейтральная ось располагается в зоне сечения. Эпюра будет разнозначная.

В ОГАСА проводились эксперименты с бетонными элементами $4 \times 14 \times 60$ см. Прочность бетона составила $R_b = 73,47$ МПа, модуль упругости $E_b = 42,8 \cdot 10^3$ МПа, прочность на растяжение 4,1 МПа.

Призмы загружались силой P с эксцентрикитетом $e = \frac{h}{3}, \frac{h}{6}, \frac{h}{10}, \frac{h}{12}$.

Сила P и эксцентрикитет всегда места и величины в процессе загружения не меняли.

Анализ результатов эксперимента с эксцентрикитетом $e = \frac{h}{6}$ и силой $P = 45\text{т}$. На первой стадии загружения до $\eta_\sigma = 0,3$ тип эксцентрикитета – граничный $e^{ep} = \frac{h}{6} = \frac{14}{6} = 2,333\text{см}$. Эпюра напряжений прямолинейная с максимальным напряжением $\sigma^{max} = 220,4\text{МПа}$ показана на рис.1.

На второй стадии загружения бетон проявляет нелинейные свойства. Эпюра напряжений будет криволинейная, и значение граничного эксцентрикитета будет другое, а сила действует с тем же самым эксцентрикитетом $\frac{h}{6}$.

Границные значения эксцентрикитетов для бетонов различных классов определяем через коэффициенты аппроксимирующего полинома пятой степени полной диаграммы бетона, которые есть в ДБН. В таблице представлены значения граничных эксцентрикитетов для всех классов бетона. Такую таблицу можно было бы поместить и в ДБН.

Для самого большого класса бетона с $R_b = 33\text{МПа}$ $e^{ep} = 0,125$. Для экспериментального бетона с прочностью $R_b = 73,47\text{МПа}$, в ДБН коэффициентов нет, но e^{ep} к 60-му классу затухают.

На второй стадии загружения граничный эксцентрикитет $e^{ep} = 0,125h$, а эксцентрикитет приложения силы $e = \frac{h}{6} = 0,16667h$. Тогда

первый $e = \frac{h}{6} > e^{ep} = \frac{h}{8}$ и его тип изменился, он стал большим. Нейтральная ось проходит в зоне сечения. Эпюра напряжений будет криволинейной и разнозначной с максимальными напряжениями $\sigma^{max} = R_b$.

Для определения расстояния от оси призмы до положения нейтральной оси воспользоваться формулой (2) нельзя, задача нелинейная. Но можно использовать экспериментальные данные

$$C_{ho.2} = \frac{h}{2} \frac{\varepsilon_2 + \varepsilon_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}. \quad (5)$$

Табличное значение e^{ep} нужно умножить на h .

Таблица граничных значений экспентрикитетов

класс бетона	C8/10	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/35	C32/40	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
S_b	0,41965	0,41525	0,41894	0,4243	0,43263	0,43934	0,44444	0,46773	0,44432	0,440047	0,40552
A_b	0,77215	0,7553	0,73964	0,72755	0,71945	0,71244	0,70562	0,69519	0,63038	0,6664	0,64885
γ^{sp}	0,59083	0,5958	0,60066	0,60458	0,60731	0,6097	0,61194	0,61494	0,618707	0,6224	0,625
e^{sp}	0,09083	0,0958	0,1007	0,1046	0,1073	0,1097	0,11194	0,11494	0,1187	0,1224	0,125
ω	0,802	0,782	0,758	0,734	0,714	0,694	0,674	0,65	0,63	0,61	0,568

При нагрузке 40т $\varepsilon_1 = +51875 \cdot 10^{-5}$, $\varepsilon_2 = -221,3 \cdot 10^{-5}$

$$C_{ho} = 7 \frac{-221 + 51,875}{-221 - 51,875} = 7 \frac{169,1}{275,9} = 4,3 \text{ см.}$$

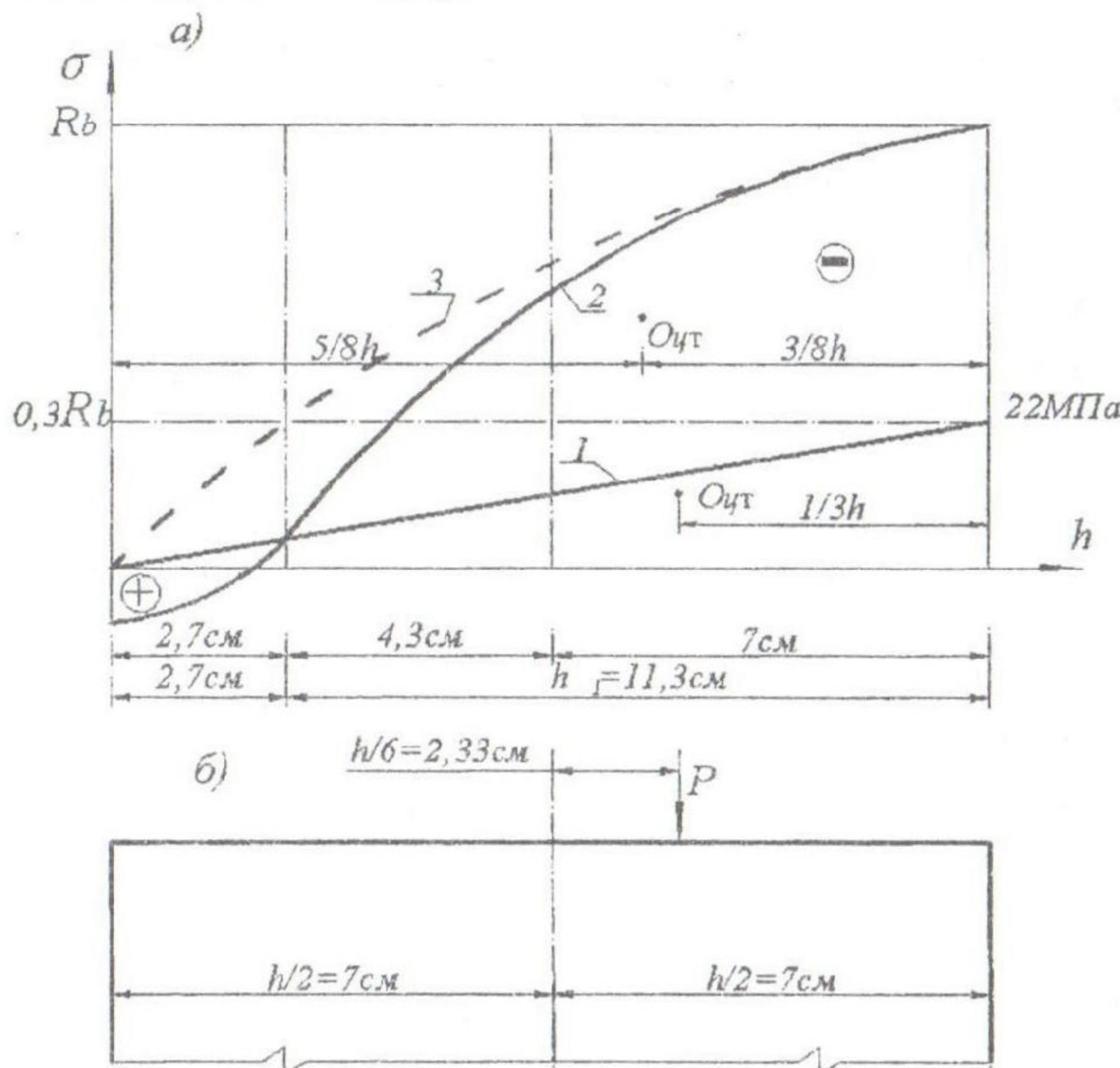


Рис. 1. а) – эпюры напряжений: 1 – на первой стадии загружения; 2 – на второй стадии загружения; 3 – эпюра при граничном значении

$$e^{sp} = \frac{h}{8}; \text{ б) схема загружений}$$

Теперь от этого положения нейтральной оси $C_{ho} = 4,3 \text{ см}$ можно построить разнозначную нелинейную эпюру напряжений, кривая 2 на рис.1.

Рассмотрим призму с эксцентрикитетом приложения силы P $e = \frac{h}{8}$, он же является и граничным $e^{sp} = 0,125h$. Максимальная площадь по таблице $A_b^T = 0,64885bh$, по квадратичному закону деформирования предложенному В.С. Дорофеевым [2] $A = 0,6667bh$.

Расхождения в площадях незначительное. Но изменение площади по таблице от низкого класса к высокому имеет тенденцию к уменьшению. Поэтому для супер высокопрочного экспериментального бетона с

прочностью 73,47 МПа табличное значение A_b^T будет еще ниже чем для бетона с прочностью 33 МПа.

Сравним площадь A_b^T с характеристикой сжатой зоны бетона ω с площадью полной однозначной сжатой эпюры внецентренно сжатых стержней с граничным эксцентризитетом. Для тяжелых бетонов ω вычисляется по формуле

$$\omega = 0,85 - 0,008R_b. \quad (6)$$

Значения ω приведены в последней строке таблицы.

Если за середину таблицы взять класс В30, тогда ω это характеристика полноты для классов бетона <В30. Совпадение с табличным значением A_b^T хорошее или удовлетворительное. Для классов бетона выше В30 ω это характеристика изящности сжатой зоны бетона, и значения $A_b^T > \omega$.

По формуле (4) для супер высокого прочного бетона $\omega = 0,26224$.

ω это характеристика сжатой зоны бетона железобетонных конструкций, а не площадь диаграммы бетона. Но при $\sigma_s = 0$ ω может дать представление о площади фактической эпюры. Поэтому для супер высокопрочного бетона при внецентренном сжатии, несущую способность при e^{sp} можно определять по A_b^T

$$P\left(\frac{h}{8}\right) = 0,64885bhR_b = 0,64885 \cdot 98 \cdot 734,7 = 46,72 \text{т},$$

по Дорофееву $P\left(\frac{h}{8}\right) = 0,6667 \cdot 98 \cdot 734,7 = 48,024 \text{т}$, предпочтительнее,

т.к. в эксперименте $P\left(\frac{h}{8}\right) = 48,5 \text{т}$.

Вторая стадия загружения завершается тем, что слева от нейтральной оси появляется растянутая зона, а в крайнем правом волокне напряжения достигают $\sigma_b^{max} = R_b = 73,47 \text{ МПа}$. Но трещины в этом волокне не появляются. В этой зоне накапливается деструкция такого уровня, что ресурс прочности исчерпался. Но при внецентренном сжатии в отличие от центрального сжатия есть волокна, часть сечения недогружена. Именно поэтому можно дать следующую порцию нагрузки. Но в крайнем волокне деформация растет, а напряжения падают. Это волокно начинает работать по нисходящей ветке. А максимальное напряжение перемещается в глубь сечения. Идет перераспределение усилий

лий. В растянутой части сечения напряжения достигают предельных. Появляются местные трещины, но они появляются в сжатой зоне. При очередной порции нагрузки между зонами проскочит магистральная трещина и произойдет разрушение стержня.

В зависимости от величины граничного эксцентрикитета разрушение может начаться с растянутой зоны, когда $e^{ep} = \frac{h}{3}$. При $e^{ep} = \frac{h}{6}$ разрушение идет с двух сторон. При $e^{ep} = \frac{h}{10}$ и $\frac{h}{12}$ разрушение начинается со стороны сжатой зоны.

Следует отметить особенность деформирования наиболее нагруженного волокна сжатой зоны. Особенность заключается в том, что в этом волокне, а точнее в этой зоне сечения реализуется нисходящая ветка диаграммы бетона. Деформации $\varepsilon_{bR} = 220 \cdot 10^{-5}$, $\varepsilon_{bu} = 280 - 290 \cdot 10^5$. Это деформации которые удалось зафиксировать в эксперименте. Деформации ε_{bu} незначительные, меньше чем $\varepsilon_{bu} = 333 \cdot 10^{-5}$ для бетона B60. с увеличением класса бетона прочность растет, а ε_{bu} убывает. Следовательно для экспериментального ε_{bu} должно быть меньше.

Выходы

1. Через граничный эксцентрикитет определяется тип эксцентрикитета.
2. Тип эксцентрикитета для бетонных стержней изменяется в процессе загружения.
3. Разрушение внецентренно сжатых бетонных стержней может начаться с разных сторон, или с двух одновременно.
4. Нисходящая ветка диаграммы бетона для определения несущей способности внецентренно сжатых стержней имеет существенное значение.

Summary

The center of gravity stress distribution eccentrically compressed concrete bars changes its position in the course of loading. This affects the value of the boundary eccentricity and bearing capacity.

1. В.Н. Байков, Э.Е. Сигалов Железобетонные конструкции. Общий курс. – М: Стройиздат, 1991. – 767с.
2. Расчет изгибаемых элементов с учетом полной диаграммы деформирования бетона. Одесса, типография ОГАСА, 2003. – 210с.