

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАСЧЕТА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СЖАТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СТЕРЖНЕЙ

К. САЛАИ

Будапештский Технический Университет, Кафедра Железобетонных конструкций

(Поступило 23, 3, 1970 г.)

Представлено: Проф. д-р Э. Белчкен

1. Введение, краткий обзор положения

В ходе разработки отечественных норм и норм СЭВ по железобетону имели место противоречащие друг другу мнения относительно характера прочности и деформации сжатых железобетонных стержней. Целью проведенного нами в 1969 году исследования было теоретическое выяснение некоторых вышесказанных противоречий. В ходе исследования мы занимались рассмотрением следующих вопросов:

а) Как изменяется укорочение бетона в крайнем наиболее сильно сжатом волокне поперечного сечения при разрушении в случаях различной мощности армирования в зависимости от эксцентриситета нормальной силы, то есть под углом поворота сечения?

Приводящиеся по этому вопросу в специальной литературе данные не однозначны. Мнение большинства исследователей таково, что с увеличением эксцентриситета увеличивается укорочение крайнего сжатого волокна.

б) Какова в практическом расчете величина расчетного сопротивления бетона, предполагаемого прямоугольно распределенным в сжатой зоне бетона, и зависит ли эта величина от эксцентриситета нормальной силы?

Советские нормы в случае центрального сжатия и при малом эксцентриситете сжатия предписывают учет расчетного сопротивления величиной $R_{пр}$, в случае сжатия большого эксцентриситета и при изгибе $R_{и} = 1,25 R_{пр}$. В других нормах, в том числе и в венгерских, не дается эта разница и для любого эксцентриситета нормальной силы предписывается одно и то же расчетное сопротивление.

в) Как в ходе практических расчетов может быть учтено то обстоятельство, что место нейтральной оси, получаемое из предполагаемого прямоугольно распределенным расчетного сопротивления бетона, не совпадает с местом фактического центра поворота сечения?

Новые венгерские нормы местом центра поворота сечения называют величину

$$x' = 1,25 x$$

от крайнего сжатого волокна, где x — высота сжатой зоны, рассчитываемая с учетом прямоугольного распределения сопротивления.

г) Какова линия несущей способности сжатого железобетонного стержня?

В специальной литературе имеются данные о том, что на определенных участках линия несущей способности сжатых железобетонных стержней не выпуклая, а вогнутая. В случае правильности этого утверждения становится недействительной теория пластического потенциала и, кроме того, становится невозможным применение теории пластичности для сжатых железобетонных стержней.

д) Какова величина учитываемой пластической деформации такого сечения, которое подвергнуто одновременно сжатию и изгибу?

Результаты опытов не дают определенного достоверного ответа относительно величины способности поворота сжатоизогнутого железобетонного сечения. Наряду с этим, теоретически также недостаточно выяснена роль нормальной силы в формировании способности пластического поворота поперечного сечения.

е) Как определить расчетную длину сжатого железобетонного стержня в зависимости от меры защемления концов стержня?

При теоретической разработке прироста эксцентриситета, достигаемого в стадии разрушения, исходили из идеальных условий (шарнирные концы стержней и т. д.). Соответствующие реальным условиям влияния специфического поведения стержней, соединенных со сжатым железобетонным стержнем, не выяснены достаточно глубоко. Разрабатываемые сейчас новые венгерские нормы по железобетону предлагают расчетную длину стержня определять с помощью теории упругой стабильности.

2. Предпосылки и данные исследования

Для достижения описанных выше целей исследования мы записали связь

$$(P, M, \varphi) = 0$$

пригодными для расчета на электронно — вычислительной машине способом, где P — нормальная сила, M — момент изгиба и φ — удельный угол поворота сечения.

При формулировке связи $(P, M, \varphi) = 0$ были использованы следующие предпосылки:

- а) действительна гипотеза плоского сечения;
- б) диаграмма напряжения-деформации бетона $(\sigma - \epsilon)$ изменяется по

линии синуса, которая при машинном расчете была заменена параболой

$$\frac{R}{R_u} = \frac{\sqrt{3}}{2} \varepsilon \left[I - \left(\frac{\varepsilon}{3} \right)^2 \right]$$

в) за момент разрушения стержня принимаем условие $\frac{\partial M}{\partial \varphi} = 0$;

г) испытуемое поперечное сечение прямоугольной формы;

д) сечение симметрично армировано и арматура расположена на крайнем волокне, то есть бетонный слой на арматуре равен нулю.

При выполнении расчетов на электронно-вычислительной машине было обращено внимание на следующие ограничения:

а) укорочение разрушения бетона $\varepsilon_{бр} = 3\text{‰}$

б) удлинение разрушения бетона $\varepsilon_{ур} = 0,15\text{‰}$

в) модуль упругости арматуры $E_a = 2,1 \cdot 10^6$ кп/см²

г) несущая способность находящейся в сжатой зоне арматуры не может превышать несущей способности сжатой зоны бетона;

д) удлинение на разрыв растянутой арматуры 15‰.

Исследование было проведено в соответствии с данными представленной ниже таблицы по парам материалов и долям железа.

№	$R_{ан}$ кп/см ²	$\frac{\mu}{R_{и}}$
1	бетонный элемент	—
2	2700	0,000050
3	3400	0,000050
4	2700	0,000150
5	3400	0,000150

Замечание: представленное в таблице μ обозначает долю железа, заложенного с одной стороны сечения, $\mu = \frac{F_a}{bh}$

3. Блок-диаграмма для расчета на электронно-вычислительной машине

Расчет был произведен на электронно-вычислительной машине Будапештского Технического Университета типа «Минск-22». Блок-диаграмма машинной программы, обработанная инженером Миклошом Берени, представле-

на рисунке 1. Для вышеуказанных данных по случаям 1-, 2-, 3-, 4- и 5-значных колонн были составлены базовые матрицы:

$$P = [P_{j,k}]; M = [M_{j,k}]$$

где $P_{jk} = P(\varphi_j, \varepsilon_k)$ и

$$M_{jk} = M(\varphi_j, \varepsilon_k)$$

здесь φ_j — удельный поворот угла сечения;

ε_k — укорочение наиболее сильно сжатого крайнего волокна сечения.

Базовые матрицы были составлены независимо от сечения и расчетного сопротивления бетона в форме $\frac{P}{bhR_u}$ и $\frac{M}{bh^2R_u}$

4. Множество линий $(P, M, \varphi) = 0$

Множество линий $(P, M, \varphi) = 0$, полученное в результате расчетов на электронно-вычислительной машине, по случаям двух колонн показано на рисунках 2—3. На отдельных рисунках в системе координат $\frac{P}{bhR_u}, \frac{M}{bh^2R_u}$ представлено множество линий $P-M$, относящееся к различным значениям поворота угла сечения:

$$\varphi \cdot h = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 2,4; 2,8; 3,2; 3,6; 4,8; 6,4; 9,0; 13$$

Пунктирная линия на рисунках обозначает линию трещины ($P_{\text{трещ}}, M_{\text{трещ}}$)

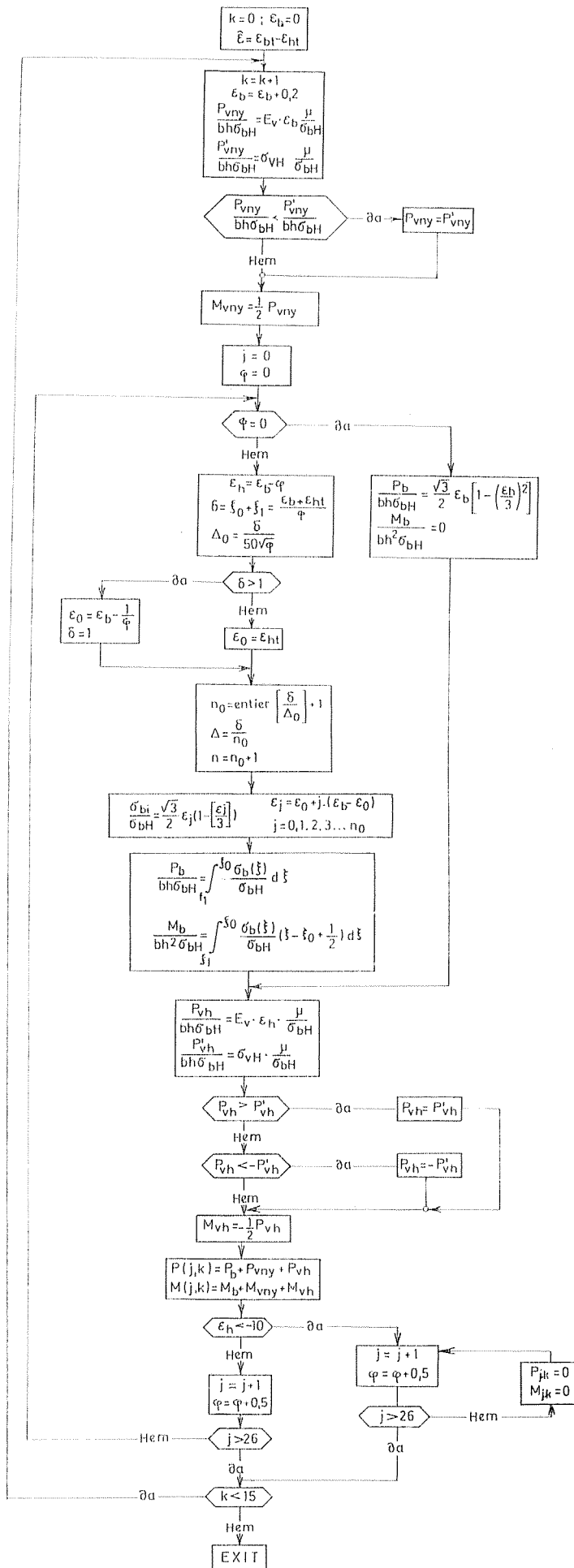
5. Множество линий $(M, \varphi_{P=\text{конст.}} = 0)$

С помощью вычислительной машины, используя связь $(P, M, \varphi) = 0$ было определено множество линий

$$\left(\frac{M}{bh^2R_u}, \varphi \cdot h \right) = 0,$$

то есть линии изгибающего момента и поворота угла сечения при различных значениях нормальной силы

$$\frac{P}{bhR_u} = \text{констант.}$$



Это множество линий по случаям двух колонн представлено на рисунках 4—5. Написанные к отдельным линиям $(M, \varphi) = 0$ цифры 10, 20, 30, 40 и т. д. обозначают величину $100 \frac{P}{bhR_u}$ нормальной силы.

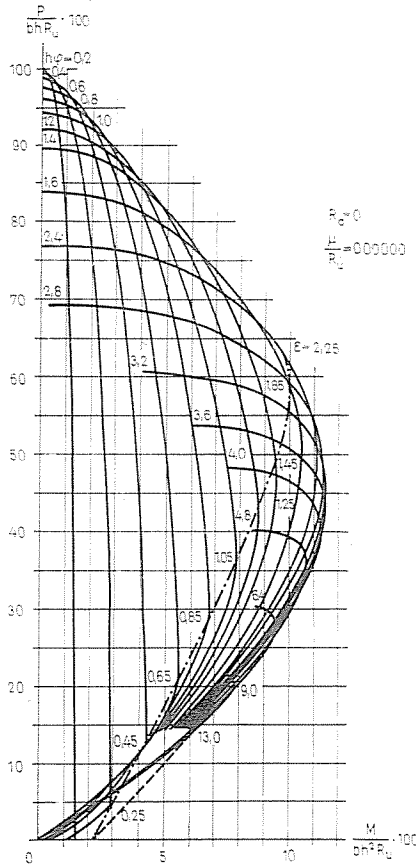


Рис. 2

Цифры, указанные на линиях $(M, \varphi)_{P=\text{конст.}} = 0$ на рисунках дают значения укорочения ϵ наиболее сильно сжатого крайнего волокна сечения.

6. Линии несущей способности $P—M$

Огибающая кривая множества линий $(P, M, \varphi) = 0$, полученная для исследованных случаев колонн, служит линией несущей способности сечения. Линии несущей способности, относящиеся к мощностям армирования вели-

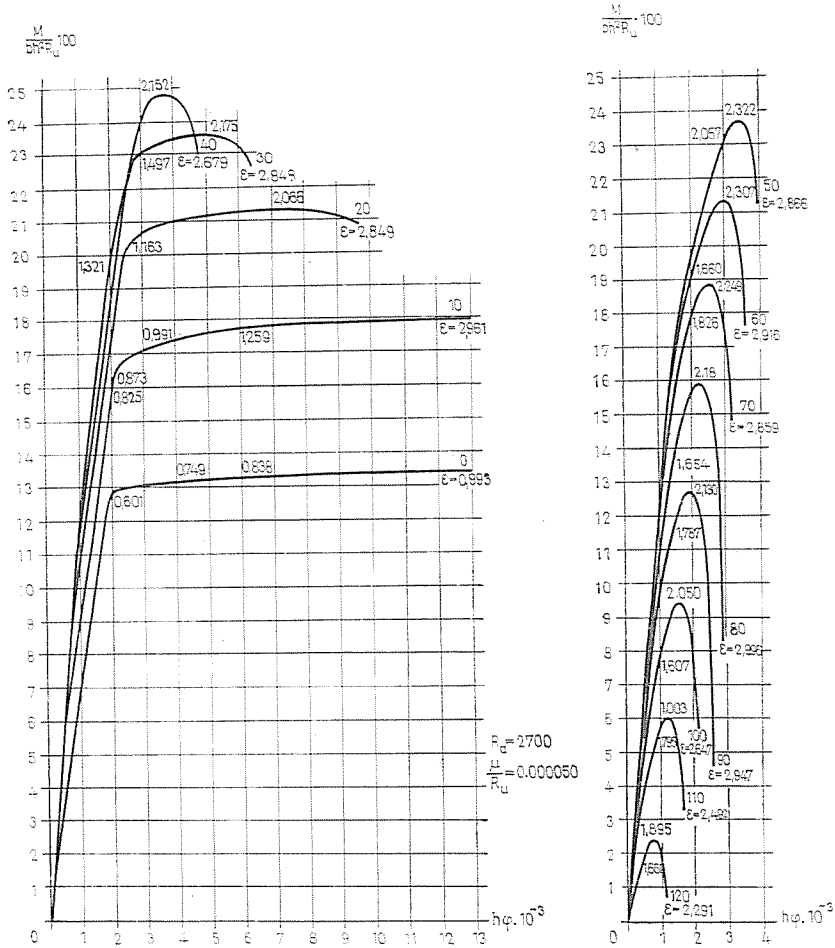


Рис. 5

чиной

$$\mu \frac{R_a}{R_u} = 0; 0,135; 0,17; 0,405; 0,51,$$

получаемой из основных данных, отображены на рисунке 6. На рисунке видно, что линия несущей способности по всей длине выпуклая.

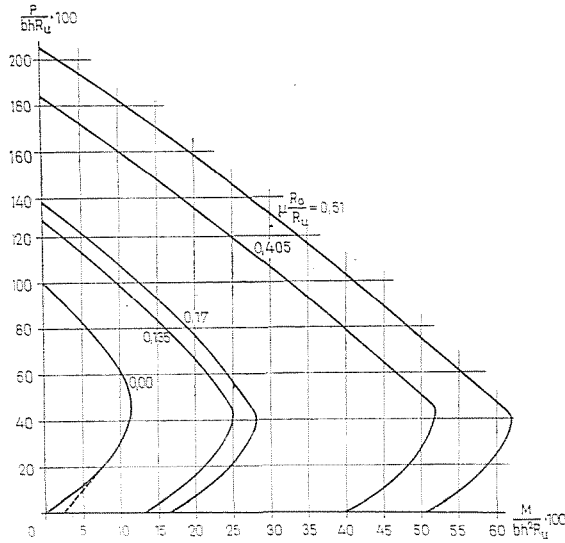


Рис. 6

7. Укорочение бетона при разрушении в крайнем наиболее сильно сжатом волокне сечения

Полученные вычислительной машиной линии $(M, \varphi) = 0$ состоят из стабильного и нестабильного участков, показывающих известное из теории стабильности двойственное состояние равновесия. Точка, означающая индифферентное состояние, где $\frac{\partial M}{\partial \varphi} = 0$, представляет собой состояние разрушения сечения. Начиная от этой точки к растущему удельному повороту угла сечения φ относится уменьшающийся изгибающий момент M .

Соответствующая индифферентному состоянию точка (M, φ) может быть охарактеризована укорочением бетона $\varepsilon_{бр}$ в наиболее сильно сжатом волокне сечения. Относящиеся к этому состоянию разрушения линии отмечены на рисунке 7 для различных случаев колонн. На горизонтальной оси отмечены также и величины $\frac{e}{h}$, полученные для отдельных случаев колонн.

Для этого множества линий характерно:

а) $\varphi = 0$, то есть в случае центрального сжатия величины укорочения бетона при разрушении $\varepsilon_{бр} = 1,73\%$ и это укорочение бетона распространяется на все сечение;

б) с увеличением удельного угла поворота сечения φ укорочение бетона при разрушении в крайнем наиболее сильно сжатом волокне сечения — в зависимости от величины мощности армирования случая-колонны — определенно увеличивается. При $\varphi \cdot h \cdot 10^{-3} = 3 \div 4$ $\varepsilon_{бр}$ достигает величины $2,2 \div 2,4\%$;

в) при большей величине удельного угла поворота сечения ($\varphi \cdot h \cdot 10^{-3} > 3 \div 4$) величина укорочения бетона при разрушении в некоторой мере падает и устанавливается в пределах $\varepsilon_{бр} = 2,1\%$:

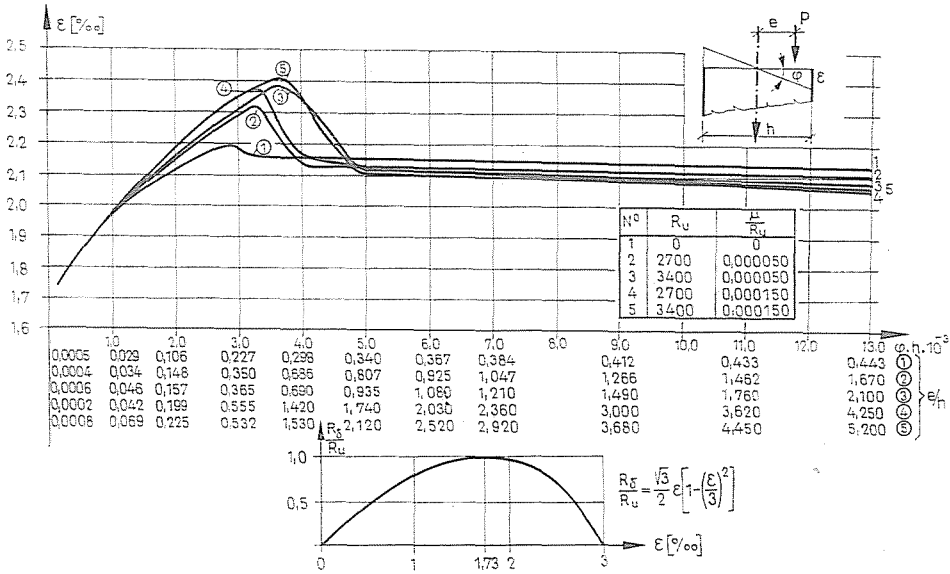


Рис. 7

8. Прочность бетона при разрушении сечения

На основании рисунка 7 к каждому напряженно-деформированному состоянию может быть получена эпюра напряжения на сжатие. Эта эпюра напряжения — по нашему предположению — участок линии синуса, отрезанный при величине $\varepsilon_{бр}$. Эту эпюру напряжения на сжатие в практических расчетах принято заменять эпюрой равномерно распределенного напряжения. Замену следует осуществлять таким образом, чтобы место площади и центра тяжести заменяющей эпюры совпадало бы с площадью и центром тяжести фактической эпюры. Исходя из этого положения, мы определили:

а) отношение ординаты заменяющей эпюры равномерно распределенного напряжения к наибольшим величинам эпюры фактического напряжения и оказалось, что это отношение, обозначаемое знаком γ , изменяется от функции $\varphi \cdot h$. (см. рис. 8) а;

б) расстояние относящегося к эпюре фактического напряжения места центра поворота и места нейтральной оси, получаемое из заменяющей диаграммы напряжения, от наиболее сильно сжатого крайнего волокна сечения, соотношение двух расстояний, обозначенное через β , также зависит от поворота угла сечения $\varphi \cdot h$. (см. рис. 9).

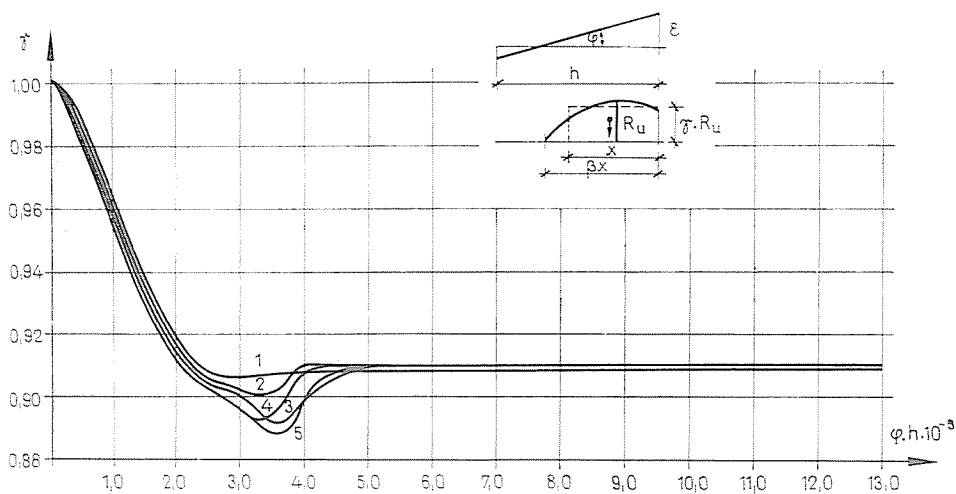


Рис. 8

На основании рисунка 8 можно установить, что если в случае теоретически центрального сжатия принимается расчетное сопротивление равным величине R , тогда в интервале малого эксцентриситета и в начале большого эксцентриситета это значение уменьшается до величины $(0,89 - 0,91)R$. С ростом эксцентриситета это значение стабилизируется при величине $0,91 R$. В случае, если представим себе какой-то начальный случайного порядка по-

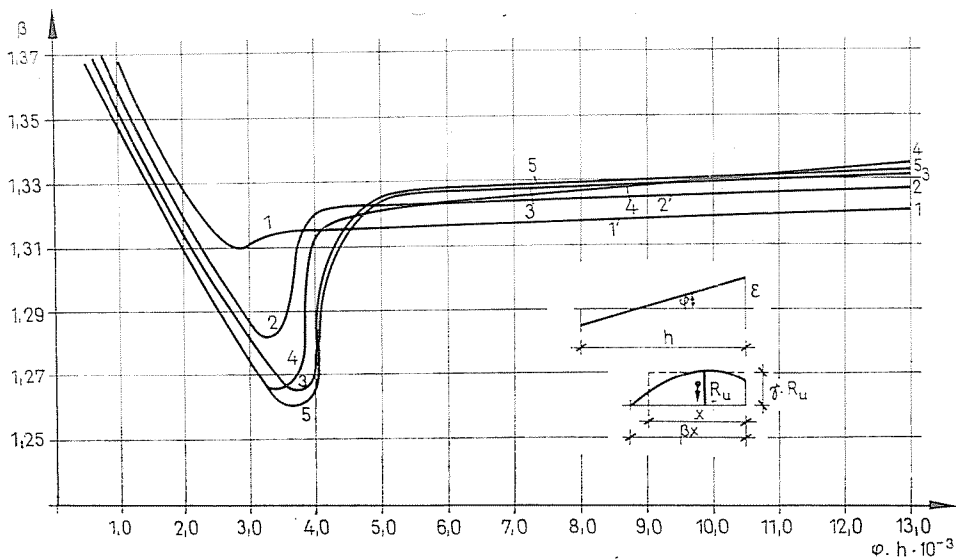


Рис. 9

ворот угла $\varphi \cdot h \cdot 10^{-3} = 1$, тогда максимальным принимаемым во внимание расчетным сопротивлением может быть величина $0,95 R$.

На основании рисунка 9 можно установить, что численное соотношение β расстояния фактического центра поворота от наиболее сильно сжатого волокна сечения и высоты заменяющей диаграммы равномерно распределенного напряжения

— при теоретически центральном сжатии $\beta = \infty$

— при начальном повороте угла случайного характера со значением $\varphi \cdot h \cdot 10^{-3} = 1,0$ величина $\beta = 1,36 \div 1,34$;

— в пределе сжатия малого эксцентриситета и в начале сжатия большого эксцентриситета величина β уменьшается и достигает значения $\beta = 1,26 \div 1,31$;

— при больших эксцентриситетах значение β изменяется в границах $\beta = 1,31 \div 1,33$.

Изменение величины β в случае значения $\varphi \cdot h$ в некоторой степени зависит от мощности армирования сечения.

9. Способность пластической деформации сечения

На основании анализа изображенных на рисунках 4 и 5 множества линий $(M, \varphi)_{P=\text{конст.}} = 0$ для разных случаев различно армированных сечений установлена способность пластической деформации сечения. Из рисунка видно, что способность пластической деформации сечения, как правило, не является идеальной, деформация сопровождается некоторым «укреплением».

В случае железобетона наибольшая способность пластической деформации сечения при чистом изгибе и практически равна нулю на границе между малым и большим эксцентриситетами (см. рис. 5.). В случае исследованных железобетонных сечений при одинаковом достаточно точном приближении могут быть установлены способности пластической деформации, приводящиеся ниже в таблице:

$\frac{P}{bhR_u}$	0	10	20	30	40
$\varphi_{pl} \cdot h \cdot 10^{-3}$	11	10	7	3,5	0
$\frac{M_{пл.}}{M_{рас.}}$	0,91	0,93	0,96	0,98	1,0

Эту таблицу мы дополнили значениями соотношения $\frac{M_{пл.}}{M_{рас.}}$. Показатель этого соотношения говорит о том, каково значение момента начала пластической деформации $M_{пл}$ относительно расчетного момента $M_{рас.}$.

Полученные для бетонных сечений способности пластической деформации показаны на следующей таблице:

$P = \frac{P}{bhR_u}$	0	10	20	30	40
$\varphi_{пл.} \cdot h \cdot 10^{-3}$	0	12	8	5	0
$\frac{M_{пл.}}{M_{рас.}}$	0,91	0,9	0,77	0,80	1

Интерес таблицы состоит в том, что при значении $P = 0$, то есть в случае чистого изгиба, способность пластической деформации равна нулю. В то же время в пределах $0 < P < 40$ можно наблюдать относительно большую способность пластической деформации.

10. Расчетная длина железобетонного стержня

Целью является исследование расчетной длины железобетонного стержня, конец которого зашпечлен не идеально, с помощью множества линий $(P, M, \varphi) = 0$. Это исследование еще не закончено, в настоящее время проводится проба машинной программы.

11. Выводы

1. Укорочение бетона в крайнем наиболее сильно сжатом волокне сечения может приниматься постоянным и в среднем равняться

$$\varepsilon_{бт} = 2,2\text{‰}$$

2. Предполагаемое прямоугольно распределенным в сжатой зоне сечения бетона расчетное сопротивление не зависит от величины эксцентритета, оно может считаться постоянным и равным значению R_u .

3. Расчетное сопротивление R_u определимо с помощью коэффициента запаса $\gamma = \gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot \dots \cdot \gamma_i = 1,4$ из квалификационной величины бетона по прочности $R_{квал.}$. Коэффициентом γ обращается внимание на не учитываемые для квалификационных проб неопределенности. В соответствии с проведенными нами исследованиями учитываемая прочность бетона конструкции отклоняется от измеренной прочности образца и размер этого отклонения $\gamma_1 = 1,1$.

4. Место фактического поворота сечения находится на расстоянии

$$x' = 1,33x$$

от наиболее сильно сжатого крайнего волокна сечения (где x — высота сжатой зоны, рассчитываемая с учетом прямоугольного распределения сопротивления).

5. В растянутой арматуре предполагаемо расчетное сопротивление до тех пор, пока выполняется условие $\xi \leq \xi_0$

Здесь $\xi = \frac{x}{h}$ — относительная высота сжатой зоны

ξ_0 — предельное положение величины в соответствии со следующей таблицей:

$R_{ан}$	2100	2700	3400	4000
ξ_0	0,518	0,477	0,434	0,402

6. Учитываемое расчетное сопротивление в растянутой арматуре в случае $\xi > \xi_0$ определимо с помощью

$$R_a = \frac{3480}{\xi} - 4620$$

7. Способность пластического перераспределения железобетонного сечения в зависимости от величины нормальной силы может быть учтена по следующей таблице:

$\frac{P}{bhR_u}$	0	10	20	30	40
$\varphi_{пл.} \cdot h \cdot 10^{-3}$	11	10	7	3,5	0

8. В случае принятия во внимание пластического перераспределения усилия учитываемый пластический момент несущей способности $M_{пл.}$ в

зависимости от предельного момента может быть рассчитан по данным следующей таблицы:

$\frac{P}{bhR_n}$	0	10	20	30	40
$\frac{M_{пл.}}{M_{рас.}}$	0,91	0,93	0,96	0,98	1,0

9. Линия несущей способности железобетонного и бетонного сечения выпуклая, и принципы теории пластичности применимы с этой точки зрения.

Резюме

В разработке норм ВНР и СЭВ по железобетону имели место противоречивые мнения относительно характера прочности и деформации сжатых железобетонных стержней. В статье приводится краткий обзор результатов проведенного нами в 1969 году теоретического исследования.

Associate Prof. Dr. Kálmán SZALAI Budapest XI., Sztoczek u. 2. Венгрия