

Сравнение результатов, полученных по нормативной методике [1] и зависимости (2), с опытными данными (рис. 3) показало, что за счет дифференцированного учета большего числа факторов точность предлагаемого расчетного аппарата выше в 1,5...2 раза.

Табл. 1. Значения коэффициента φ_s

$\mu \cdot 10^4$	M/M_{lim}										
	R_b	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
≤ 2	1,9	1,9	1,9	1,7	1,2	0,56	0,26	0,14	0,05	0	
4	1,9	1,9	1,9	1,6	1,05	0,5	0,22	0,14	0,05	0	
6	1,9	1,9	1,6	1,1	0,65	0,4	0,2	0,12	0,05	0	
8	1,9	1,9	1,5	1	0,6	0,36	0,2	0,12	0,05	0	
12	1,9	1,9	1,5	1,1	0,6	0,34	0,2	0,12	0,05	0	
16	1,9	1,9	1,5	1,1	0,6	0,34	0,2	0,12	0,05	0	
≥ 20	1,9	1,9	1,7	1,2	0,65	0,4	0,22	0,16	0,1	0	

Полученные результаты базируются на обширном экспериментальном материале и могут быть использованы на практике в период завершения теоретических исследований в рассматриваемой области [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. СНиП 2.03.01-84. Бетонные и железобетонные конструкции. — М., 1985. — 79 с.
2. Л а р и ч е в а И.Ю., Г у щ а Ю.П. Соотношение между призмной и кубиковой прочностями в обычном тяжелом и мелкозернистом бетонах // Исследования железобетон. конструкций при статич., повтор. и динамич. воздействиях. — М., 1984. — С.82-93. 3. П е р е с ы п к и н Е.И., П у з а н к о в Ю.И., П е р е с ы п к и н С.Е. Масштабный фактор при растяжении и изгибе бетонных элементов // Изв. вузов. Стр-во и архитектура. — 1985. — № 9. — С. 1-4. 4. З а л е с о в А.С., К л и м о в Ю.А. Развитие физической модели работы железобетонного элемента при действии поперечных сил с учетом условий деформирования // Напряженно-деформиров. состояние бетон. и железобетон. конструкций. — М., 1986. — С. 92-105.

УДК 624.04

В.Г.КАЗАЧЕК, М.О.ШЕР,
С.Г.БЫКОВСКИЙ, С.В.ГРИБ

ПОЛНАЯ ДИАГРАММА ДЕФОРМИРОВАНИЯ СЕЧЕНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Наряду с "точными" способами расчета деформаций железобетонных конструкций не теряют своей актуальности приближенные подходы, например метод "характерных точек". Суть его состоит в том, что кривизна или жесткость сечения определяется по интерполяции между характерными точками на диаграмме деформирования сечения (появление трещин, начало текучести арматуры, предельное усилие и т.д.), для которых усилия и соответствующие

им деформации могут быть достаточно просто определены по СНИПу или с использованием других экспериментально обоснованных рекомендаций.

Для построения опорной кривой на "кратковременной" диаграмме момент— кривизна ($M-k$) выделяются точки, характеризующие качественные изменения в стадиях напряженно-деформированного состояния сечения. Например, для нормально армированных сечений, работающих в стадии эксплуатации с трещинами в растянутой зоне, рассматриваются четыре промежуточные точки, принимаемые в дальнейшем за узлы интерполяции (рис. 1): образование трещин (c), появление текучести арматуры (y), достижение максимального усилия (u), раздробление бетона сжатой зоны, т.е. физическое разрушение сечения (*). Соответствующие этим точкам значения M и k для конкретных сечений определяются при известном значении продольного усилия N следующим образом.

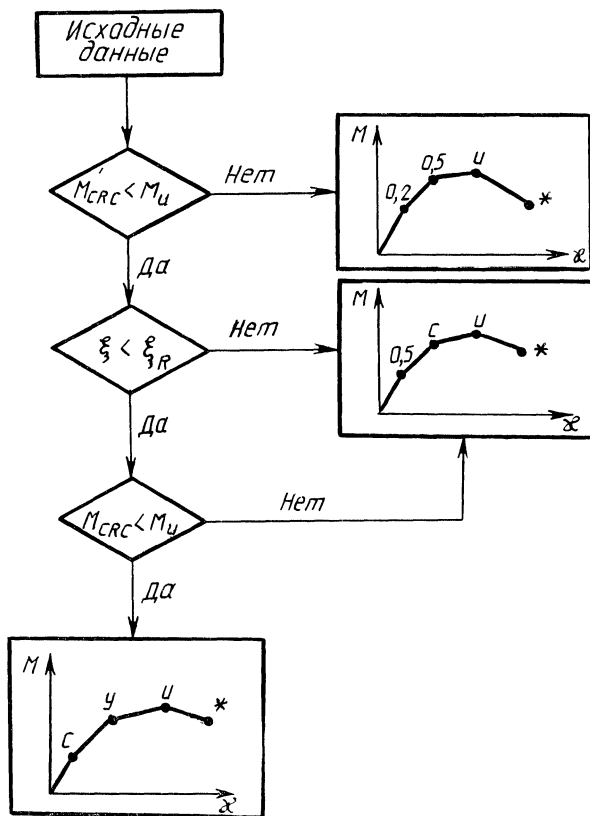


Рис. 1. К назначению узлов интерполяции зависимости "момент—кривизна"

Значения M_u и M_c вычисляются по СНИП 2.03.01—84. Предшествующие разрушению длительные нагрузки влияют на прочность сечения. Используем понятия индексов армирования растянутой зоны мягкой сталью (K_s) и твердой

сталью (K_{sp}), характеризующих "долю" конкретной арматуры в суммарном предельном усилии, воспринимаемом всей арматурой:

$$K_s = \frac{A_s R_s}{A_s R_s + A_{sp} R_{sp}} ;$$

$$K_{sp} = \frac{A_{sp} R_{sp}}{A_s R_s + A_{sp} R_{sp}} .$$

При определении M_* учтем то обстоятельство, что, как показывают эксперименты, в слабоармированных ненапряженных элементах в стадиях, близких к разрушению, арматура работает с самоупрочнением и при этом $M_* > M_u$. При увеличении площади растянутой арматуры и продольной силы N обычно наблюдается все более крутая ниспадающая ветвь зависимости $M - \kappa$. С учетом данных работы [1]

$$M_* = M_u [(1 + K) - 1,55 (\xi/\xi_R)],$$

где $K = 0,12K_s$; если $\xi < 0,645 \xi_R$, $K_{sp} = 1$, то $K = 0,12$.

Для элементов при $\xi < \xi_R$ изгибающий момент, соответствующий началу текучести (или условной текучести) арматуры (M_y), несколько меньше предельного M_u . Приблизительно примем, что отношение $\gamma = M_y/M_u$ линейно изменяется от $\gamma = 1$ (при $\xi = \xi_R$) до $\gamma = \alpha$, где α — минимальное значение γ при $\xi \rightarrow 0$. Учитывая результаты расчетов, выполненных с варьированием предварительного напряжения σ_{sp} арматуры A_{sp} , запишем:

$$M_y = M_u \left[\alpha + (1 - \alpha) \frac{\xi}{\xi_R} \right],$$

где

$$\alpha = 0,9 - 0,15K_{sp}.$$

Кривизну, соответствующую моменту M_y , определим, пользуясь гипотезой плоских сечений и полагая деформации растянутой арматуры (из мягкой стали) $\epsilon_y = R_s/E_s$:

$$\kappa_y = \frac{\epsilon_y}{h_0 (1 - 1,1\xi_y/\omega)},$$

где для смешанного армирования

$$\epsilon_y = \frac{(R_{sp} - 1,1\sigma_{sp}) A_{sp} R_{sp} + R_s^2 A_s}{E_s (A_{sp} R_{sp} + A_s R_s)} .$$

Анализ характера изменения высоты сжатой зоны бетона с ростом нагрузки [1] позволил связать $\xi_y (M_y)$ с высотой сжатой зоны бетона $\xi (M)$ в виде

$$\xi_y = \xi \frac{0,78 + \xi/\xi_R}{1,78 \xi/\xi_R}.$$

В формуле учитывается, что в элементах из бетона невысокой прочности характер изменения высоты сжатой его зоны с ростом нагрузки более "спокойный".

Кривизна, соответствующая максимальной нагрузке M_u , $\kappa = 0,8\epsilon_{bu}/(\xi h_0)$, а соответствующая относительная деформация крайнего сжатого волокна бетона ϵ_{bu} характеризуется обычно как "предельная сжимаемость бетона", за которую, как правило, принимают последние, зарегистрированные в опытах значения ϵ_b . При центральном сжатии ($x = h$) относительная деформация соответствует напряжениям $\sigma_b = R_b$, а при наличии градиента напряжений увеличивается:

$$\epsilon_{bu} = 10^{-3} [(3 \frac{x}{h} - 1,5)^2 - 4,5] K_b K'_s,$$

где $K_b = \sqrt[4]{R_b/40}$; $K'_s = 1 + \mu'_s (E_s/E_b)$; $\mu'_s = A'_s/A_b$; при $x/h < 0,5$ выражение в круглых скобках следует принимать равным нулю.

Коэффициент K_b учитывает некоторое повышение ϵ_{bu} с ростом прочности бетона. Числовые значения эмпирических коэффициентов подобраны так, чтобы для центрально сжатых неармированных призм ($x/h = 1$, $K'_s = 1$) получать значения ϵ_{bu} , близкие к опытным. Коэффициент K'_s учитывает увеличение ϵ_{bu} с ростом площади сжатой арматуры (предложение А.Аксомитоса). Анализ экспериментов свидетельствует о том, что коэффициент K'_s может быть использован и для расчетов элементов с арматурой класса А-III. Аналогично можно учесть влияние поперечного, косвенного и фибрового армирования. Кривизну элемента в сечении при раздроблении бетона сжатой зоны сечения (в конце ниспадающего участка кривой деформирования) можно вычислить через деформации бетона и арматуры в этом состоянии:

$$\kappa_* = \frac{\epsilon_{b*} + \epsilon_s}{h_0},$$

причем ϵ_{b*} будем считать константой, зависящей только от прочности бетона, и определим как деформации, соответствующие моменту практически полной потери сопротивления материала при накоплении критического объема повреждений и появлении вогнутости на ниспадающей ветви диаграммы $\sigma - \epsilon$ (при $\sigma_b = 0,25R_b$). Для тяжелого бетона можно принять

$$\epsilon_{b*} = 4,7 \cdot 10^{-3} / K_{b1},$$

где $K_{b1} = \sqrt[3]{R_b/40}$.

По предложению Е.А.Чистякова,

$$\epsilon_s = \frac{\omega - \xi}{1,5(h/h_0) - 0,5\omega - \xi} 10^{-3} \text{ при } \xi \geq \omega;$$

$$\epsilon_s = \epsilon_1 \left(\frac{\omega}{\xi} - 1 \right) 10^{-3} \text{ при } \xi > \omega,$$

где $\epsilon_1 = 1,6 / (1 - 0,9\omega)$.

Для определения кривизны элемента в сечении без трещин (в условиях кратковременного нагружения) воспользуемся известными зависимостями, но введем переменный коэффициент снижения жесткости K_{sh} , учитывающий быстроснатекающую ползучесть:

$$\kappa_i = \frac{M_i}{E_b I_{Red} K_{shi}} \quad (1)$$

При любых $M_i < M_c$ в зависимости от уровня напряжений в бетоне и их градиента по высоте сечения значение K_{sh} , можно вычислить по формуле

$$K_{sh} = 1,5 - 1,25 \frac{\sigma_{max}}{R_b} \quad (2)$$

где

$$0,5 \leq K_{sh} \leq 1,0; \quad (3)$$

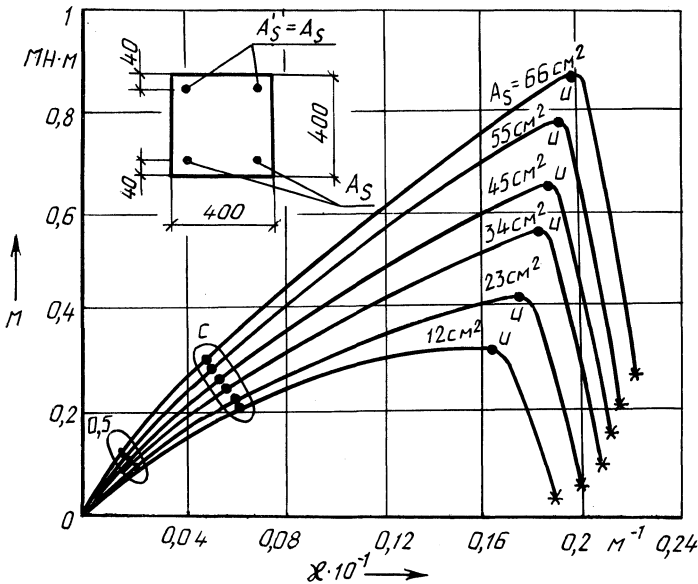


Рис. 2. Зависимость "момент—кривизна" для сжато-изогнутого элемента при $N = 3,34$ МН ($\sigma_T = 400$ МПа, $R_b = 29$ МПа, $R_{bt} = 2,1$ МПа, $a = 4$ см)

σ_{\max} — максимальное напряжение в бетоне от внешней нагрузки и предварительного напряжения арматуры, посчитанных для элемента как для упругого тела.

Числовые значения эмпирических параметров в формулах (2) и (3) подобраны так, чтобы значения κ_i близко соответствовали опытным данным в диапазоне $0 \leq M_i \leq M_c$ [2]. Учитывая, что в ряде случаев некоторые из перечисленных характерных точек могут отсутствовать (например, при сильном обжатии элемент вплоть до разрушения работает без трещин и без текучести арматуры), а также для удобства решения задачи целесообразно назначить четыре промежуточных узла интерполяции. Для некоторых ситуаций используют дополнительные точки при $M_i = 0,5M_c$ и $M_i = 0,2M_c$. Соответствующие им кривизны определяются по формулам (1) — (3).

В общем случае рекомендуется следующий алгоритм назначения координат узлов интерполяции в зависимости от параметров сечений и значения продольной силы. При наличии напрягаемой арматуры начальная точка графиков смещается от опорной кривой по оси κ на величину выгиба. Зная координаты опорных точек в плоскости $M - \kappa$, определяют приращения кривизны от кратковременного увеличения усилий с использованием формул линейной

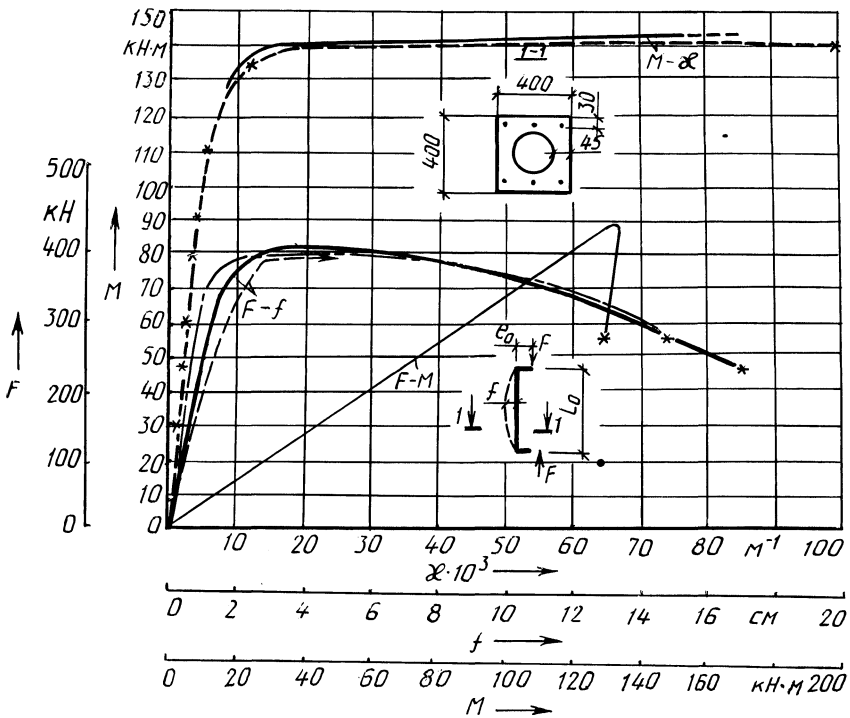


Рис. 3. Опытные и расчетные усилия и деформации среднего сечения внецентренно сжатой колонны ($A_s = A'_s = 5,76 \text{ см}^2$ (3 $\varnothing 16$ АIII), $\sigma_T = 476 \text{ МПа}$, $R_b = 37,2 \text{ МПа}$, $l_0 = 5,34 \text{ м}$, $e_0 = 0,3 \text{ м}$; пунктиром показаны теоретические зависимости)

или криволинейной интерполяции. Достаточно плавное сопряжение в узлах дает, в частности, степенная зависимость вида:

$$\kappa_i^0 = \kappa_B - (\kappa_B - \kappa_H) \left(\frac{M_B - M_i}{M_B - M_H} \right)^{0,8},$$

где $M_B, M_H, \kappa_B, \kappa_H$ — координаты смежных (верхнего и нижнего) узлов интерполяции.

При неизменной во всем диапазоне увеличения M сжимающей силе N опорные координаты определяют один раз и расчетная кривая деформирования повторяет опорную. Если на каком-либо этапе загрузки изменяется также и N , находят новые опорные точки κ (M) и по ним определяют приращение кривизны $\Delta\kappa$.

Составлена программа "Сечение" для ЕС ЭВМ, реализующая приведенную выше методику расчета. В качестве примера ее применения на рис. 2 приведены расчетные зависимости для сжато-изогнутого элемента. На рис. 3 сопоставлены опытные и расчетные данные для внецентренно сжатой колонны, в том числе экспериментальная и теоретическая зависимости прогиба середины колонны от нагрузки, найденные по программе "PLG", реализующей расчет стержневых систем методом догружения [3], в которой в качестве подпрограммы использована программа "Сечение".

ЛИТЕРАТУРА

1. М а м е д о в Т.И. Исследование несущей способности и деформации в стадиях, близких к разрушению, изгибаемых элементов с новыми видами стержневой арматуры из бетона прочностью до 1000 кгс/см²: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Баку, 1975. — 25 с. 2. Г а н а г а П.Н., М а и л я н Л.Р. Учет неупругих свойств бетона при определении жесткости железобетонных балок // *Вопр. прочности, деформативности и трещиностойкости железобетона*. — Ростов-на-Дону, 1979. — С. 122—128. 3. С и д о р о в и ч Е.М., К а з а ч е к В.Г., К р ю ч к о в А.А., Ч и с т я к о в Е.А. Принципы расчета физически и геометрически нелинейных железобетонных стержневых систем // *Вопр. стр-ва и архитектуры*. — Мн., 1986. — Вып. 15. — С. 32—36.

УДК 624.04

А.Е.ШИЛОВ

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ РАСЧЕТНЫХ ДЛИН ДВУХВЕТВЕВЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН БЕЗ РАСПОРОК

В результате исследований, проведенных в БПИ, были составлены алгоритмы, позволяющие в автоматизированном режиме рассчитать на устойчивость первого рода двухветвевую стойку каркаса по заданным геометрическим и жесткостным параметрам с учетом сжимающих продольных сил. Их реализация для упрощенного варианта основной системы осуществлена на программируемых микрокалькуляторах типа "Электроника БЗ-34" (программа "МИКРО") [1].