

РАСЧЕТ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛАСТИНЧАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА

Риблов В.В.

Луганский национальный аграрный университет

Железобетонные пластинчатые элементы находят широкое применение в конструкциях мостов, перекрытий гражданских и промышленных зданий, специальных сооружений. Для перекрытий промышленных зданий в силу больших нагрузок определяющим был и остается расчет по первой группе предельных состояний (расчет по второй группе предельных состояний был неопределяющим – условия ограничения прогибов и перемещений выполнялись автоматически). Для других объектов в силу относительной малости нагрузок и проектирования пластинчатых элементов как гибких пластин основным является расчет по второй группе предельных состояний.

Методики расчета, рекомендуемые действующими нормативными документами, не всегда дают возможность правильно оценить деформативность конструкций, поскольку в их основу положены предпосылки об упругой или об упругопластической работе материала в эксплуатационной стадии. Положение усугубляется еще и тем, что расчеты ведутся, как правило, с применением недеформированных схем.

Опыт эксплуатации шатровых плит перекрытий и современных зданий с монолитным железобетонным каркасом свидетельствует о развитии прогибов и перемещений таких конструкций во времени. В ряде случаев подобное обстоятельство приводит просто к неудобствам проживания, но иногда приводит к аварийным ситуациям. Поэтому при проектировании необходимо выполнять расчеты с учетом нелинейных свойств железобетона.

Работа отвечает актуальным направлениям научно-технической политики Украины в области оценки технического состояния строительных конструкций в соответствии с Постановлением Кабинета Министров Украины №409 от 5 мая 1997 г. «Об обеспечении надежности и безопасной эксплуатации зданий, сооружений и инженерных сетей».

Анализ последних достижений и публикаций свидетельствует о необходимости продолжения исследований, направленных на решение важной народно-хозяйственной задачи – проектирования пластинчатых элементов перекрытий гражданских зданий с ограниченной деформативностью. Решение этой задачи возможно различными методами. При этом учет упругопластических свойств материалов конструкций и изменения условий закрепления производится не всегда адекватно [1, 2 и др.], что не дает возможности сделать правильные выводы о том, удовлетворяют ли запроектированные конструкции ограничения по обеим группам предельных состояний.

Целью настоящих исследований является разработка методики учета нелинейных свойств железобетона при расчетах гибких железобетонных пластинчатых элементов.

В основу разработанной методики учета нелинейных свойств железобетона при расчетах пластинчатых элементов положены следующие предпосылки [1–7 и др.]:

- в качестве расчетного принимается сечение, напряженно-деформированное состояние (НДС) которого отвечает среднему состоянию блока между трещинами, если таковые имеются;
- для средних деформаций бетона и арматуры принимается гипотеза плоских сечений;
- связь между напряжениями и деформациями бетона и арматуры принимается в виде условно-точных или идеализированных диаграмм (рис. 1, 2);

– влияние трещинообразования на работу железобетона учтено путем умножения сопротивления R_{bt} на коэффициент $\psi_{bt} < 1$;

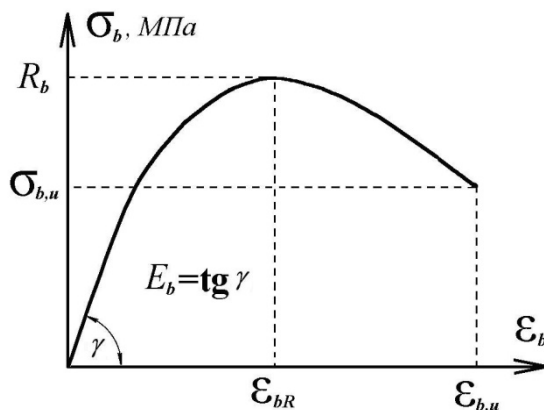
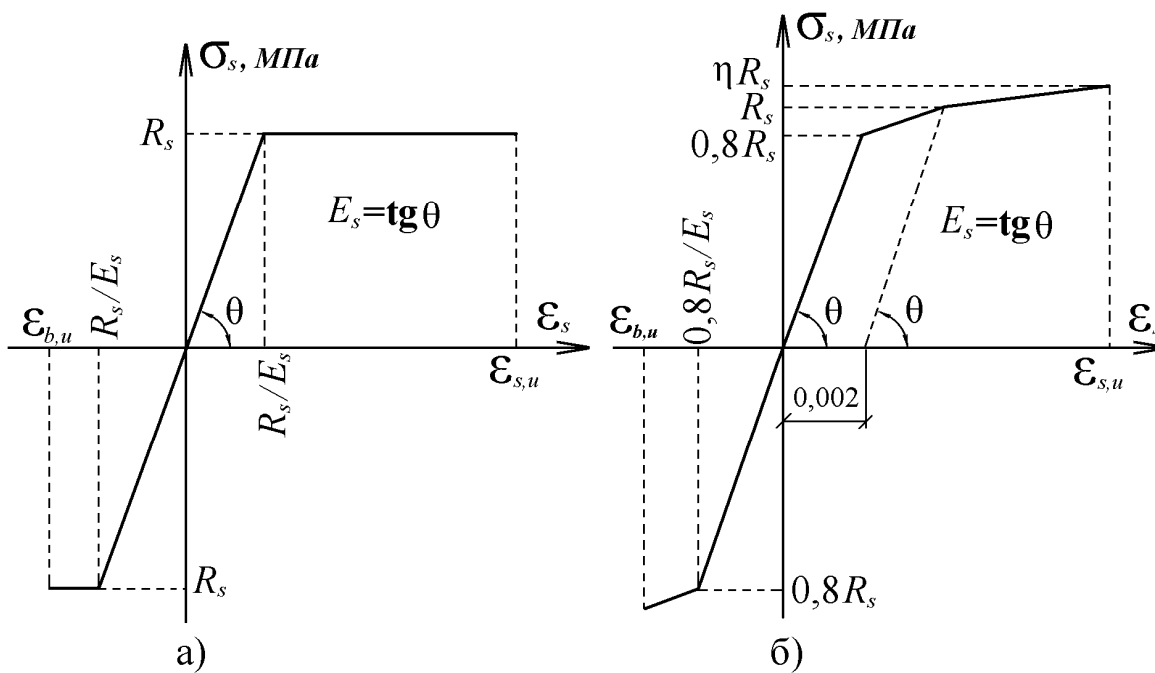


Рис. 1. Условно-точная диаграмма "σ - ε" бетона:



а – с физическим пределом текучести; б – с условным пределом текучести

Рис. 2. Диаграммы "σ - ε" арматурной стали

– увеличение прочности и деформативности бетона, работающего в условиях плоского напряженного состояния, учитывается с помощью зависимостей:

$$\frac{\sigma_{b,1}}{R_b} = 1 + 1,38 \frac{\sigma_{b,2}}{R} - 1,15 \left(\frac{\sigma_{b,2}}{R} \right)^2; \quad (1)$$

$$\frac{\varepsilon_{b,1}}{\varepsilon_{b,R}} = 1 + 2,15 \frac{\sigma_{b,2}}{R_b} - 1,95 \left(\frac{\sigma_{b,2}}{R_b} \right)^2, \quad (2)$$

где $\sigma_{b,1}$, $\varepsilon_{b,1}$ – призмная прочность и соответствующая относительная деформация при поперечных напряжениях $\sigma_{b,2}$ (рис. 3);

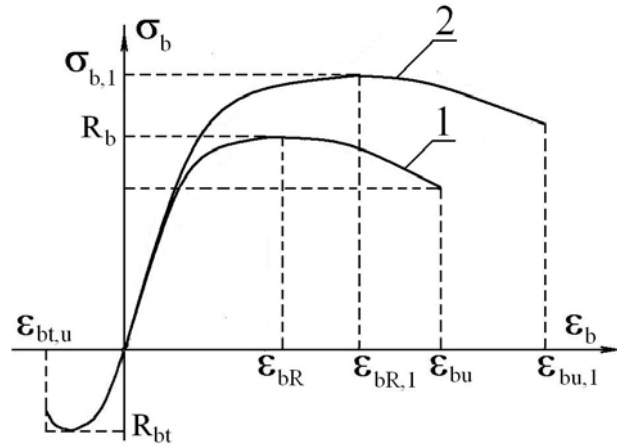


Рис. 3. Диаграмма "σ - ε" бетона при поперечном обжатии

– исчерпание несущей способности сечения происходит в случае достижения деформациями сжатого бетона или растянутой арматуры своих предельных значений $\varepsilon_{b,u}$, $\varepsilon_{s,u}$.

Несущая способность (пригодность к нормальной эксплуатации) пластинчатой конструкции считается исчерпанной, если:

– достигнут максимум на кривой состояния (предельное состояние первой группы)

$$\frac{dq}{df} = 0, \quad (3)$$

где q – модуль вектора силового воздействия;
 f – некоторое характерное перемещение конструкции (рис. 4);

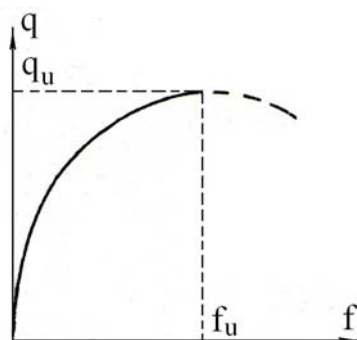


Рис. 4. Диаграмма состояния пластинчатой конструкции

– разрушено хотя бы одно сечение любого элемента конструкции (предельное состояние первой группы);

– ширина раскрытия трещин или прогибы превысили допустимые по условиям эксплуатации значения (предельное состояние второй группы).

Нелинейные свойства материала удобнее всего учитывать путем изменения модуля упругости. Отношение значения упругопластического модуля к упругому удобнее всего определять из диаграммы "момент–кривизна" расчетного сечения.

Построение этой диаграммы можно выполнить в такой последовательности.

1. В зависимости от типа решаемой задачи (расчет по предельным состояниям первой или второй группы) для заданных классов бетона и арматуры принимают характеристики $R_b, R_{b,t}, E_b, \varepsilon_{b,u}, \varepsilon_{bR}, R_s, E_s$. Размеры сечения, как правило, считаются заданными и устанавливаются на стадии проектирования и компоновки здания.
2. Задают начальные значения $\varepsilon_1 = (0,1..0,2) \cdot \varepsilon_{b,u}$, $\sigma_{bt} = 0,5 \cdot R_{bt}$, а также упругие характеристики арматуры и стали балок, величину кривизны (для начала достаточно принять $\chi_i = \varepsilon_{1,i} / h$, где h – толщина пластины, i – номер этапа расчета) и шаг изменения деформаций на сжатой фибре $\Delta\varepsilon$ и кривизны $\Delta\chi$.
3. При заданном значении деформаций на сжатой фибре бетона $\varepsilon_{1,i}$ находят кривизну χ_i и другие параметры НДС сечения, используя гипотезу плоских сечений, и подставляют их в уравнение равновесия $\sum X = 0$.
4. Последовательным изменением величины кривизны добиваются такого НДС, при котором уравнение $\sum X = 0$ выполняется с заданной точностью.
5. Найденные значения параметров НДС сечения при заданной величине кривизны подставляют в уравнение равновесия $\sum M = 0$. Определяют i -ю точку диаграммы «момент–кривизна» с параметрами (χ_i, M_i) .
6. Увеличивают $\varepsilon_{1,i+1} = \varepsilon_{1,i} + \Delta\varepsilon$, причем $\varepsilon_{1,i+1} \leq \varepsilon_{b,u}$. Выполняют расчеты по п.п. 3–5, последовательно уточняя параметры НДС сечения, до тех пор, пока не будет получена новая точка зависимости «момент–кривизна».
7. Построение диаграммы «момент–кривизна» завершают после получения величины изгибающего момента при $\varepsilon_{1,i+1} = \varepsilon_{b,u}$. По полученным данным строят зависимость «момент–кривизна» в виде кусочно-линейной функции или получают уравнение, например, с использованием метода наименьших квадратов.
8. Находят величину упругопластического модуля для i -ой точки зависимости «момент–кривизна» по формуле

$$E_{i,pl} = \frac{M_i}{\chi_i}. \quad (4)$$

Найденные значения $E_{i,pl}$ в дальнейшем используют при расчетах пластинчатых систем, которые моделируются КЭ: в зависимости от уровня действующих усилий уточняют модули упругости КЭ в направлении осей X, Y , а также модуль сдвига $G_{i,pl}$, и последующим перерасчетом уточняют НДС конструкции.

При расчетах конструкций с применением метода конечных разностей неупругая работа материала пластинки учитывается следующим образом [8]:

$$D \left(\theta_x \frac{\partial^4 W}{\partial x^4} + 2 \sqrt{\theta_x \cdot \theta_y} \frac{\partial^4 W}{\partial x^2 \partial y^2} + \theta_y \frac{\partial^4 W}{\partial y^4} \right) = p(x,y), \quad (5)$$

где $\theta_x = E_{x,i,pl}/E$, $\theta_y = E_{y,i,pl}/E$ – отношение упругопластического модуля в направлении осей X и Y соответственно к модулю упругости в точке с координатами x,y ;

$W = W(x,y)$ – прогиб пластинки в точке с координатами x,y ;

D – цилиндрическая жесткость пластинки;

$p(x,y)$ – значение интенсивности распределенной нагрузки в точке с координатами x,y .

Выражения для моментов и поперечных сил могут быть записаны с учетом коэффициентов перевода модуля упругости в упругопластический модуль в направлении осей X и Y (θ_x , θ_y) и упругого модуля сдвига в упругопластический модуль сдвига ($\sqrt{\theta_x \cdot \theta_y}$) следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} M_x &= -D \left(\theta_x \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \nu \sqrt{\theta_x \cdot \theta_y} \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right) \\ M_y &= -D \left(\nu \sqrt{\theta_x \cdot \theta_y} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \theta_y \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right) \\ M_{xy} &= -D \sqrt{\theta_x \cdot \theta_y} (1-\nu) \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} Q_x &= -D \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta_x \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \sqrt{\theta_x \cdot \theta_y} \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right) \\ Q_y &= -D \frac{\partial}{\partial y} \left(\sqrt{\theta_x \cdot \theta_y} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \theta_y \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

Решение уравнения (5) должно удовлетворять граничные условия на всех четырех краях пластинки. Граничные условия определяются конструктивными особенностями перекрытия. Например, при условии свободного опирания по краям b прогиб W и момент на краях $x=0$, $x=a$ равны нулю.

Выводы

1. Предложена методика расчета железобетонных пластинчатых элементов с учетом упругопластических свойств железобетона. Учет упругопластических свойств железобетона возможен как при расчетах с использованием как известных ВК МКЭ типа ЛИРА, SCAD и др., так и с применением других численных методов, например, метода конечных разностей. При формировании матрицы жесткости нелинейные свойства учитываются введением понижающих коэффициентов θ_x , θ_y и $\sqrt{\theta_x \cdot \theta_y}$, которые

уточняются в процессе итерационного расчета модели. Прогибы контурных точек пластинки считаются либо заданными, либо определяются дополнительно при расчетах контурных элементов.

2. При расчетах пластинчатых конструкций по данной методике можно определить не только НДС, но и дать прогноз развития осадок и прогибов во времени. Для этого достаточно задать изменение жесткостных характеристик пластинки в каждой точке с учетом реологических свойств железобетона.
3. Предложенная методика расчета может быть распространена и на комбинированные сталежелезобетонные изгибаемые элементы, состоящие из стальных балок и монолитной железобетонной плиты, работающие за пределами упругой стадии. В этом случае необходимо учесть либо совместность деформаций, либо возможность отрыва плиты от стальных балок. Такой расчет возможен с применением известных ВК МКЭ типа ЛИРА, SCAD и др.

Литература

1. СНиП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции / Минстрой России. – М.: ГП ЦПП, 1996. – 76 с.
2. Проектирование железобетонных конструкций: Справочное пособие / А.Б. Гольшев, В.Я. Бачинский, В.П. Полищук, А.В. Харченко, И.В. Руденко; Под ред. А.Б. Гольшева. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Будівельник, 1990. – 544 с.
3. Методические рекомендации по уточненному расчету железобетонных элементов с учетом полной диаграммы сжатия бетона / НИИСК Госстроя СССР. – Киев, 1987. – 24 с.
4. Гольшев А.Б., Бамбура А.Н. и др. Модель железобетона для расчета конструкций на деформируемом основании // Материалы Международной научно-технической конференции «Новые методы расчета, материалы и технологии в строительстве» (Алчевск, сентябрь 1993 года). – Алчевск: ДГМИ, 1993. – С. 3-6.
5. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. – М.: Стройиздат, 1996. – 408 с.
6. Войцехівський О.В., Байда Д.М. Процес руйнування бетону стиснутої зони залізобетонних балочних елементів під час руйнування // Буд. конструкції: Міжвідом. наук.-техн. зб. / НДІБК. – Київ: НДІБК, 2004. – Вип. 60. – С. 575–581.
7. Голоднов А.И. Исчерпание несущей способности железобетонных стержневых элементов существующих зданий и сооружений // Збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Луганськ: Вид-во ЛНАУ, 2007. – № 71 (94). – С. 64-69.
8. Блейх Ф. Устойчивость металлических конструкций. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1959. – 544 с.