УДК 624.012.45

Дорофеев В.С., д.т.н., проф., Ковров А.В. к.т.н., доц., Ковтуненко А.В., Высочан Н.К. (Одесская государственная академия строительства и архитектуры г. Одесса, Украина)

К ПОСТРОЕНИЮ ЛИНЕАРИЗИРОВАННЫХ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Даны предложения к построению линеаризированных диаграмм на основе принятой авторами деформационной модели работы сечений изгибаемых железобетонных элементов.

Ключевые слова: железобетонный изгибаемый элемент, деформирование, изгибающий момент, кривизна.

Постановка проблемы. Работы [1], [2], [3], [5], [6] посвящены изучению напряженно-деформированного состояния железобетонных изгибаемых элементов, проводимому под руководством А.Н.Бамбуры, Л.Р.Маиляна, В.С.Дорофеева, Е.М.Бабича, которые основывались на реальных диаграммах деформирования материалов.

В работах [4], [7] предложен практический способ построения диаграмм «изгибающий момент – кривизна», основанный на предложениях И.Е.Прокоповича.

Для более полного учета процессов, происходящих в статически неопределимых железобетонных конструкциях при изменении нагрузок вплоть до разрушения, необходимо использование диаграмм «изгибающий момент – кривизна» наиболее полно учитывающих работу материалов и имеющих возможность применения в практических расчетах.

Целью работы является выработка принципов построения линеаризированных диаграмм «изгибающий момент – кривизна», основанных на деформационной модели работы нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов для использования в практических расчетах статически неопределимых систем.

Основная часть. Авторами для создания модели деформирования изгибающих железобетонных элементов были приняты следующие предпосылки:

1. Считается справедливой гипотеза Бернулли (гипотеза плоских сечений) – деформации по высоте сечения изменяются по линейному закону.
2. Между арматурой и окружающим ее бетоном существует сцепление,

такое, что деформации в арматуре и бетоне равны между собой.

3. Зависимость «напряжения – деформации» при сжатии бетона описывается, в соответствии с предложениями А.Н.Бамбуры [2].

Связь между напряжениями и деформациями при растяжении бетона описывается при помощи диаграммы Прандтля.

Взаимосвязь между напряжениями и деформациями при растяжении и сжатии арматуры описывается при помощи диаграммы Прандтля.

4. Сопротивление расчетного сечения считается исчерпанным при достижении деформациями крайнего сжатого волокна бетона или растянутой арматуры предельных значений, соответственно ε_{bu} и ε_{su}.

Задача определения напряженно-деформированного состояния в поперечном сечении изгибаемого железобетонного элемента на всех стадиях решена при помощи шагово-итерационной методики [8].

Авторами предложен алгоритм и разработана в системе компьютерной математики MATLAB программа определения напряженно-деформированного состояния нормальных прямоугольных сечений железобетонных изгибаемых элементов вплоть до предельного состояния с построением диаграммы «изгибающий момент – кривизна».

Сравнение экспериментально полученных и теоретически построенных по предлагаемой методике диаграмм показало высокую сходимость.

При построении линеаризированных диаграмм «изгибающий момент – кривизна» работы сечений железобетонных изгибаемых элементов значения изгибающих моментов и соответствующих им кривизн в характерных точках определяются из уравнений равновесия, приведенных ниже:

$$\sum \boldsymbol{X} = 0; \quad \boldsymbol{N}_b + \boldsymbol{N}_{sc} - \boldsymbol{N}_{bt} - \boldsymbol{N}_s = 0; \tag{1}$$

$$\sum \boldsymbol{m}_O = 0; \quad \boldsymbol{M}_b + \boldsymbol{M}_{sc} + \boldsymbol{M}_{bt} + \boldsymbol{M}_s = \boldsymbol{M}. \tag{2}$$

Проведенные исследования свидетельствуют о том, что для железобетонных балок, имеющих различное армирование, порядок построения линеаризированных диаграмм отличается.

Для сечений слабо армированных железобетонных изгибаемых элементов диаграмма «изгибающий момент – кривизна» имеет вид, представленный на рис. 1.

Для определения значений изгибающего момента и кривизны, соответствующих точке $\boldsymbol{A}$, на первом этапе определяем высоту сжатой зоны бетона, задаваясь деформацией крайнего растянутого волокна бетона $\varepsilon_{bt} = \varepsilon_{btu}$, предшествующей образованию трещины. Деформации крайнего сжатого волокна бетона, растянутой и сжатой арматуры, выраженные через деформацию крайнего растянутого волокна бетона, подставляем в уравнение (1).

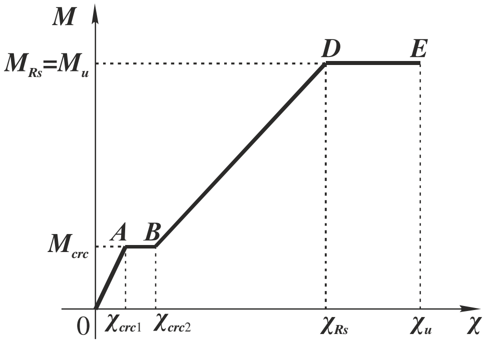

Рис. 1. Диаграмма «изгибающий момент – кривизна» работы сечений слабо армированных железобетонных изгибаемых элементов

После преобразований получим:

$$\boldsymbol{F}_1\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{b}}^6+\boldsymbol{F}_2\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{b}}^5+\boldsymbol{F}_3\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{b}}^4+\boldsymbol{F}_4\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{b}}^3+\boldsymbol{F}_5\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{b}}^2+\boldsymbol{F}_6\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{b}}+\boldsymbol{F}_7=0 \qquad (3)$$

где:

$$\boldsymbol{F}_1=\boldsymbol{R}_b\boldsymbol{b}\boldsymbol{\varepsilon}_{btu}^2(30\boldsymbol{a}_1\boldsymbol{\varepsilon}_{bR}^4-20\boldsymbol{a}_2\boldsymbol{\varepsilon}_{btu}\boldsymbol{\varepsilon}_{bR}^3+15\boldsymbol{a}_3\boldsymbol{\varepsilon}_{btu}^2\boldsymbol{\varepsilon}_{bR}^2-12\boldsymbol{a}_4\boldsymbol{\varepsilon}_{btu}^3\boldsymbol{\varepsilon}_{bR}+$$

$$+10\boldsymbol{a}_5\boldsymbol{\varepsilon}_{btu}^4)-30\boldsymbol{R}_{bt}\boldsymbol{b}\boldsymbol{\varepsilon}_{bR}^5(2\boldsymbol{\varepsilon}_{btu}-\boldsymbol{\varepsilon}_{btR});$$

$$\boldsymbol{F}_2=-6\boldsymbol{R}_b\boldsymbol{b}\boldsymbol{h}\boldsymbol{\varepsilon}_{btu}^2\boldsymbol{\varepsilon}_{bR}(20\boldsymbol{a}_1\boldsymbol{\varepsilon}_{bR}^3-10\boldsymbol{a}_2\boldsymbol{\varepsilon}_{btu}\boldsymbol{\varepsilon}_{bR}^2+5\boldsymbol{a}_3\boldsymbol{\varepsilon}_{btu}^2\boldsymbol{\varepsilon}_{bR}-2\boldsymbol{a}_4\boldsymbol{\varepsilon}_{btu}^3)+$$

$$+60\boldsymbol{E}_s\boldsymbol{\varepsilon}_{stu}^2\boldsymbol{\varepsilon}_{bR}^5(\boldsymbol{A}_s'+\boldsymbol{A}_s)+180\boldsymbol{R}_{bt}\boldsymbol{b}\boldsymbol{h}\boldsymbol{\varepsilon}_{bR}^5(2\boldsymbol{\varepsilon}_{btu}-\boldsymbol{\varepsilon}_{btR});$$

$$\boldsymbol{F}_3=15\boldsymbol{R}_b\boldsymbol{b}\boldsymbol{h}^2\boldsymbol{\varepsilon}_{btu}^2\boldsymbol{\varepsilon}_{bR}^2(12\boldsymbol{a}_1\boldsymbol{\varepsilon}_{bR}^3-4\boldsymbol{a}_2\boldsymbol{\varepsilon}_{btu}\boldsymbol{\varepsilon}_{bR}+\boldsymbol{a}_3\boldsymbol{\varepsilon}_{btu}^2)-60\boldsymbol{E}_s\boldsymbol{\varepsilon}_{btu}^2\boldsymbol{\varepsilon}_{bR}^5\times$$

$$\times\left[4\boldsymbol{h}(\boldsymbol{A}_s+\boldsymbol{A}_s')+\boldsymbol{A}_s'\boldsymbol{a}'+\boldsymbol{A}_s\boldsymbol{h}_0\right]-450\boldsymbol{R}_{bt}\boldsymbol{b}\boldsymbol{\varepsilon}_{bR}^5\boldsymbol{h}^2(2\boldsymbol{\varepsilon}_{btu}-\boldsymbol{\varepsilon}_{btR});$$

$$\boldsymbol{F}_4=-20\boldsymbol{R}_b\boldsymbol{b}\boldsymbol{h}^3\boldsymbol{\varepsilon}_{btu}^2\boldsymbol{\varepsilon}_{bR}^3(6\boldsymbol{a}_1\boldsymbol{\varepsilon}_{bR}-\boldsymbol{a}_2\boldsymbol{\varepsilon}_{btu})+120\boldsymbol{E}_s\boldsymbol{\varepsilon}_{btu}^2\boldsymbol{\varepsilon}_{bR}^5\boldsymbol{h}\times$$

$$\times\left[3\boldsymbol{h}(\boldsymbol{A}_s'+\boldsymbol{A})+2(\boldsymbol{A}_s'\boldsymbol{a}'+\boldsymbol{A}_s\boldsymbol{h}_0)\right]+600\boldsymbol{R}_{bt}\boldsymbol{b}\boldsymbol{h}^3\boldsymbol{\varepsilon}_{bR}^5(2\boldsymbol{\varepsilon}_{btu}-\boldsymbol{\varepsilon}_{btR});$$

$$\boldsymbol{F}_5=30\boldsymbol{R}_b\boldsymbol{b}\boldsymbol{h}^4\boldsymbol{\varepsilon}_{btu}\boldsymbol{\varepsilon}_{bR}^4\boldsymbol{a}_1-120\boldsymbol{E}_s\boldsymbol{\varepsilon}_{btu}^2\boldsymbol{\varepsilon}_{bR}^5\boldsymbol{h}^2\left[2\boldsymbol{h}(\boldsymbol{A}_s'+\boldsymbol{A}_s)+\right.$$

$$\left.+3(\boldsymbol{A}_s'\boldsymbol{a}'+\boldsymbol{A}_s\boldsymbol{h}_0)\right]-450\boldsymbol{R}_{bt}\boldsymbol{b}\boldsymbol{\varepsilon}_{bR}^5\boldsymbol{h}^4(2\boldsymbol{\varepsilon}_{btu}-\boldsymbol{\varepsilon}_{btR});$$

$$\boldsymbol{F}_6=60\boldsymbol{E}_s\boldsymbol{\varepsilon}_{bR}^5\boldsymbol{\varepsilon}_{btu}^2\boldsymbol{h}^3\left[\boldsymbol{h}(\boldsymbol{A}_s'+\boldsymbol{A}_s)+4(\boldsymbol{A}_s'\boldsymbol{a}'+\boldsymbol{A}_s\boldsymbol{h}_0)\right]+$$

$$+180\boldsymbol{R}_{bt}\boldsymbol{b}\boldsymbol{\varepsilon}_{bR}^5\boldsymbol{h}^5\times(2\boldsymbol{\varepsilon}_{btu}-\boldsymbol{\varepsilon}_{btR});$$

$$\boldsymbol{F}_7=-60\boldsymbol{E}_s\boldsymbol{\varepsilon}_{bR}^5\boldsymbol{\varepsilon}_{btu}^2\boldsymbol{h}^4(\boldsymbol{A}_s'\boldsymbol{a}'+\boldsymbol{A}_s\boldsymbol{h}_0)-30\boldsymbol{R}_{bt}\boldsymbol{b}\boldsymbol{\varepsilon}_{bR}^5\boldsymbol{h}^6(2\boldsymbol{\varepsilon}_{btu}-\boldsymbol{\varepsilon}_{btR}).$$

Для определения значения изгибающего момента значения деформаций и высоты сжатой зоны бетона подставляем в уравнение (2). Значение кривизны, соответствующей точке ***A*** определяем исходя из гипотезы плоских сечений при известных значениях деформаций крайнего растянутого, крайнего сжатого волокна бетона и высоты сечения.

Значения изгибающих моментов, соответствующие точкам ***A*** и ***B***, равны между собой. Для определения значения кривизны, соответствующего точке ***B*** деформации растянутой и сжатой арматуры, выраженные через деформации крайнего сжатого волокна бетона ε_b и высоту сжатой зоны бетона x_b, подставляем в уравнения (1) и (2). После преобразований получим систему уравнений:

$$\begin{cases} F_{1,1}\varepsilon_b^6 x_b^2 + F_{1,2}\varepsilon_b^5 x_b^2 + F_{1,3}\varepsilon_b^4 x_b^2 + F_{1,4}\varepsilon_b^3 x_b^2 + F_{1,5}\varepsilon_b^2 x_b^2 + \\ + F_{1,6}\varepsilon_b^2 x_b + F_{1,7}\varepsilon_b^2 + F_{1,8} x_b^2 = 0; \\ F_{2,1}\varepsilon_b^7 x_b^3 + F_{2,2}\varepsilon_b^6 x_b^3 + F_{2,3}\varepsilon_b^5 x_b^3 + F_{2,4}\varepsilon_b^4 x_b^3 + F_{2,5}\varepsilon_b^3 x_b^3 + \\ + F_{2,6}\varepsilon_b^3 x_b^2 + F_{2,7}\varepsilon_b^3 x_b + F_{2,8}\varepsilon_b^3 + F_{2,9}\varepsilon_b^2 x_b + F_{2,10} x_b^3 = 0; \end{cases} \tag{4}$$

где:

$F_{1,1} = 10 R_b b a_5;$

$F_{1,2} = 12 R_b b a_4 \varepsilon_{bR};$

$F_{1,3} = 15 R_b b a_3 \varepsilon_{bR}^2;$

$F_{1,4} = 20 R_b b a_2 \varepsilon_{bR}^3;$

$F_{1,5} = 30 R_b b a_1 \varepsilon_{bR}^4;$

$F_{1,6} = 60 E_s \varepsilon_{bR}^5 (A_s' + A_s);$

$F_{1,7} = -60 E_s \varepsilon_{bR}^5 (A_s' a' + A_s h_0);$

$F_{1,8} = -30 R_{bt} b E_s \varepsilon_{bR}^5 (2\varepsilon_{btu} - \varepsilon_{btR});$

$F_{2,1} = 60 R_b b a_5;$

$F_{2,2} = 70 R_b b a_4 \varepsilon_{bR};$

$F_{2,3} = 84 R_b b a_3 \varepsilon_{bR}^2;$

$F_{2,4} = 105 R_b b a_2 \varepsilon_{bR}^3;$

$F_{2,5} = 140 R_b b a_1 \varepsilon_{bR}^4;$

$F_{2,6} = 420 E_s \varepsilon_{bR}^5 (A_s' + A_s);$

$F_{2,7} = -840 E_s \varepsilon_{bR}^5 (A_s' a' + A_s h_0);$

$F_{2,8} = 420 E_s \varepsilon_{bR}^5 (A_s' + a'^2 + A_s h_0^2);$

$F_{2,9} = -420 M_{crc} \varepsilon_{bR}^5;$

$F_{2,10} = 70 R_{bt} b \varepsilon_{bR}^5 (3\varepsilon_{btu}^2 - \varepsilon_{btR}^2).$

Значения кривизны, соответствующие точкам диаграммы деформирования после образования трещины, определяем исходя из гипотезы плоских сечений при известных значениях деформаций крайнего сжатого волокна бетона, растянутой арматуры и рабочей высоты сечения.

Значения изгибающих моментов и кривизн, соответствующих точкам ***A*** и ***B***, для сечений нормально и сильно армированных железобетонных изгибаемых элементов определяются аналогично.

Для определения значений изгибающего момента и кривизны, соответствующих точке $\boldsymbol{D}$, на первом этапе определяем высоту сжатой зоны бетона, задаваясь деформацией растянутой арматуры $\varepsilon_{st} = \varepsilon_{sR}$. Деформации крайнего сжатого волокна бетона и сжатой арматуры, выраженные через деформацию растянутой арматуры, подставляем в уравнение (1). После преобразований получим уравнение, совпадающее с уравнением (3), коэффициенты которого вычисляются по следующим формулам:

$$F_1 = R_b b \varepsilon_{sR}^2 (30a_1 \varepsilon_{bR}^4 - 20a_2 \varepsilon_{bR}^3 \varepsilon_{sR} + 15a_3 \varepsilon_{bR}^2 \varepsilon_{sR}^2 -$$

$$-12a_4 \varepsilon_{bR} \varepsilon_{sR}^3 + 10a_5 \varepsilon_{sR}^4) - 30R_{bt} b \varepsilon_{bR}^5 (2\varepsilon_{btu} - \varepsilon_{btR});$$

$$F_2 = -6R_b b \varepsilon_{sR}^2 \varepsilon_{bR} h_0 (20a_1 \varepsilon_{bR}^3 - 10a_2 \varepsilon_{bR}^2 \varepsilon_{sR} + 5a_3 \varepsilon_{bR} \varepsilon_{sR}^2 - 2a_4 \varepsilon_{sR}^3) +$$

$$+60\varepsilon_{bR}^5 \varepsilon_{sR} (A_s' E_s \varepsilon_{sR} + A_s R_s) + 180R_{bt} b h_0 \varepsilon_{bR}^5 (2\varepsilon_{btu} - \varepsilon_{btR});$$

$$F_3 = 15R_b b \varepsilon_{sR}^2 \varepsilon_{bR}^2 h_0^2 (12a_1 \varepsilon_{bR}^3 - 4a_2 \varepsilon_{sR} \varepsilon_{bR} + a_3 \varepsilon_{bR}^2) - 450R_{bt} b \varepsilon_{bR}^5 h_0^2 \times$$

$$\times (2\varepsilon_{btu} - \varepsilon_{btR}) - 60\varepsilon_{bR}^5 \varepsilon_{sR} \left[A_s' E_s \varepsilon_{sR} (4h_0 + a') + 5A_s R_s h_0 \right];$$

$$F_4 = -20R_b b \varepsilon_{bR}^3 \varepsilon_{sR}^2 h_0^3 (6a_1 \varepsilon_{bR} - a_2 \varepsilon_{sR}) + 600R_{bt} b \varepsilon_{bR}^5 h_0^3 (2\varepsilon_{btu} - \varepsilon_{btR}) +$$

$$+120\varepsilon_{bR}^5 \varepsilon_{sR} h_0 \times \left[A_s' E_s \varepsilon_{sR} (3h_0 + 2a') + 5A_s' R_s h_0) \right];$$

$$F_5 = 30R_b b a_1 \varepsilon_{bR}^4 \varepsilon_{sR}^2 h_0^4 - 450R_{bt} b \varepsilon_{bR}^5 h_0^4 (2\varepsilon_{btu} - \varepsilon_{btR}) - 120\varepsilon_{bR}^5 \varepsilon_{sR} h_0^2 \times$$

$$\times \left[A_s' E_s \varepsilon_{sR} (2h_0 + 3a') + 5A_s R_s h_0 \right];$$

$$F_6 = 180R_{bt} b \varepsilon_{bR}^5 h_0^5 (2\varepsilon_{btu} - \varepsilon_{btR}) + 60\varepsilon_{bR}^5 \varepsilon_{sR}^2 h_0^3 \times$$

$$\times \left[A' E_s \varepsilon_{sR} (h_0 + 4a') + 5A_s R_s h_0 \right];$$

$$F_7 = -30R_{bt} b \varepsilon_{bR}^5 h_0^6 (2\varepsilon_{btu} - \varepsilon_{btR}) - 60\varepsilon_{bR}^5 \varepsilon_{sR} h_0^4 (A_s' E_s \varepsilon_{sR} a' + A_s R_s h_0).$$

Значения изгибающего момента и кривизны, соответствующие точке $\boldsymbol{E}$, определяются аналогично значениям, соответствующим точке $\boldsymbol{D}$, с заменой деформаций $\varepsilon_{st} = \varepsilon_{sR}$ на деформации $\varepsilon_{st} = \varepsilon_{su}$.

Значения изгибающих моментов и кривизн, соответствующих точкам $\boldsymbol{D}$ и $\boldsymbol{E}$, для сечений нормально армированных железобетонных изгибаемых элементов определяются аналогично.

Для сечений нормально армированных железобетонных изгибаемых элементов диаграмма «изгибающий момент – кривизна» имеет вид, представленный на рис. 2.

Для определения значений изгибающего момента и кривизны, соответствующих точке $\boldsymbol{C}$, на первом этапе определяем высоту сжатой зоны бетона, задаваясь деформацией крайнего сжатого волокна бетона $\varepsilon_b = \varepsilon_{bR}$.

Деформации растянутой и сжатой арматуры, выраженные через деформацию крайнего сжатого волокна бетона, подставляем в уравнение (1).

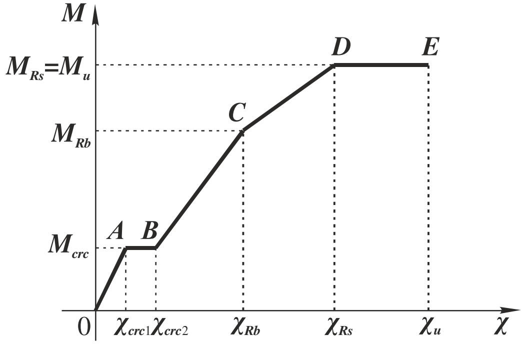

Рис. 2. Диаграмма «изгибающий момент – кривизна» работы сечений нормально армированных железобетонных изгибаемых элементов

После преобразований получим уравнение, имеющее вид:

$$F_1 x_b^6 + F_2 x_b + F_3 = 0, \tag{5}$$

где:

$$F_1 = R_b b \varepsilon_{bR}(30a_1 + 20a_2 + 15a_3 + 12a_4 + 10a_5) - 30R_{bt} b(2\varepsilon_{btu} - \varepsilon_{btR});$$

$$F_2 = 60E_s \varepsilon_{bR}^2 (A_s' + A_s);$$

$$F_3 = -60E_s \varepsilon_{bR}^2 (A_s' a' + A_s h_0).$$

Значения изгибающего моментов и кривизны, соответствующих точке ***C***, для сечений сильно армированных железобетонных изгибаемых элементов определяются аналогично.

Для сечений сильно армированных железобетонных изгибаемых элементов диаграмма «изгибающий момент – кривизна» имеет вид, представленный на рис. 3.

При определении значений изгибающего момента и кривизны, соответствующих точке ***F***, для нахождения искомых величин двух уравнений равновесия недостаточно. Задаваясь условием экстремальности изгибающего момента, получаем дополнительное уравнение, используя условие:

$$\frac{dM}{d\varepsilon_b} = 0 \tag{6}$$

Деформации растянутой и сжатой арматуры, выраженные через деформацию крайнего сжатого волокна бетона и высоты сжатой зоны бетона, подставляются в уравнения (1) и (6).

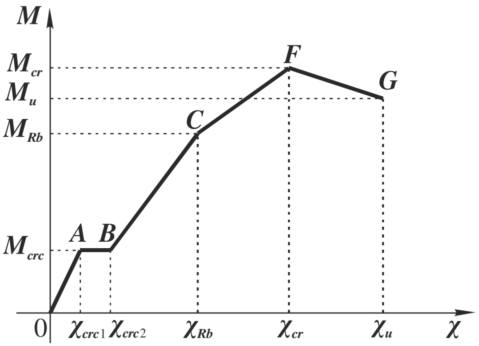

Рис. 3. Диаграмма «изгибающий момент – кривизна» работы сечений сильно армированных железобетонных изгибаемых элементов

После преобразований получим систему уравнений:

$$\begin{cases} F_{1,1}\varepsilon_b^6 x_b^2 + F_{1,2}\varepsilon_b^5 x_b^2 + F_{1,3}\varepsilon_b^4 x_b^2 + F_{1,4}\varepsilon_b^3 x_b^2 + F_{1,5}\varepsilon_b^2 x_b^2 + \\ +F_{1,6}\varepsilon_b^2 x_b + F_{1,7}\varepsilon_b^2 + F_{1,8}\varepsilon_b x_b + F_{1,9} x_b^2 = 0; \\ F_{2,1}\varepsilon_b^7 x_b^3 + F_{2,2}\varepsilon_b^6 x_b^3 + F_{2,3}\varepsilon_b^5 x_b^3 + F_{2,4}\varepsilon_b^4 x_b^3 + F_{2,5}\varepsilon_b^3 x_b^3 + \\ F_{2,6}\varepsilon_b^3 x_b^2 + F_{2,7}\varepsilon_b^3 x_b + F_{2,8}\varepsilon_b^3 + F_{2,9} x_b^3 = 0; \end{cases} \tag{7}$$

где:

$F_{1,1} = 10R_b b a_5;$ $F_{2,1} = 150R_b b a_5;$

$F_{1,2} = 12R_b b a_4 \varepsilon_{bR};$ $F_{2,2} = 140R_b b a_4 \varepsilon_{bR};$

$F_{1,3} = 15R_b b a_3 \varepsilon_{bR}^2;$ $F_{2,3} = 124R_b b a_3 \varepsilon_{bR}^2;$

$F_{1,4} = 20R_b b a_2 \varepsilon_{bR}^3;$ $F_{2,4} = 105R_b b a_2 \varepsilon_{bR}^3;$

$F_{1,5} = 30R_b b a_1 \varepsilon_{bR}^4;$ $F_{2,5} = 70R_b b a_1 \varepsilon_{bR}^4;$

$F_{1,6} = 60A_s E_s \varepsilon_{bR}^5;$ $F_{2,6} = 210A_s E_s \varepsilon_{bR}^5;$

$F_{1,7} = -60A_s E_s \varepsilon_{bR}^5 h_0;$ $F_{2,7} = -420A_s E_s \varepsilon_{bR}^5 h_0;$

$F_{1,8} = -60A_s' R_s \varepsilon_{bR}^5;$ $F_{2,8} = 210A_s E_s \varepsilon_{bR}^5 h_0^2;$

$F_{1,9} = -30R_{bt} b \varepsilon_{bR}^5 (2\varepsilon_{btu} - \varepsilon_{btR});$ $F_{2,9} = -70R_{bt} b \varepsilon_{bR}^5 (3\varepsilon_{btu}^2 - \varepsilon_{btR}^2);$

Для определения значений изгибающего момента и кривизны, соответствующих точке G на первом этапе определяем высоту сжатой зоны бетона, задаваясь деформацией крайнего сжатого волокна бетона $\varepsilon_b = \varepsilon_{bu}$, предшествующей разрушению элемента. Деформации растянутой и сжатой арматуры, выраженные через деформацию крайнего сжатого волокна бетона, подставляем в уравнение (1). После преобразований получим уравнение, совпадающее с уравнением (5), коэффициенты которого вычисляются по следующим формулам:

$$F_1 = R_s b \varepsilon_{bu}^2 (30 a_1 \varepsilon_{bR}^4 + 20 a_2 \varepsilon_{bR}^3 \varepsilon_{bu} + 15 a_3 \varepsilon_{bR}^2 \varepsilon_{bu}^2 +$$

$$+ 12 a_4 \varepsilon_{bR} \varepsilon_{bu}^3 + 10 a_5 \varepsilon_{bu}^4) - 30 R_{bt} b \varepsilon_{bR}^5 (2\varepsilon_{btu} - \varepsilon_{btR});$$

$$F_2 = 60 \varepsilon_{bR}^5 \varepsilon_{bu} (A_s' R_s + A_s E_s \varepsilon_{bu});$$

$$F_3 = -60 A_s E_s \varepsilon_{bR}^5 \varepsilon_{bu}^5 h_0.$$

Выводы

1. Предложены принципы построения линеаризированных диаграмм, основанных на деформационной модели работы нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов для использования в практических расчетах статически неопределимых систем.
2. Предложены уравнения и системы уравнений для определения значений кривизны и изгибающих моментов в характерных точках диаграмм «изгибающий момент – кривизна» для железобетонных сечений изгибаемых элементов при различном армировании.

1. Бабич В.Є. Напружено-деформований стан і міцність нерозрізних залізобетонних балок при одноразових та повторних навантаженнях: Дис. … канд. техн. наук. – Рівне, 2005. – 176 с.
2. Бамбура А.М. Експериментальні основи прикладної деформаційної теорії залізобетону: Дис. … докт. техн. наук. – Київ, 2005. – 379 с.
3. Дорофеев В.С., Барданов В.Ю. Расчет изгибаемых элементов с учетом полной диаграммы деформирования бетона. Монография. – Одесса: Издательство ОГАСА, 2003. – 210 с.
4. Ковров А.В. К анализу закономерностей деформирования сечений неразрезных железобетонных балок / А.В.Ковров, Р.Э.Чайковский, Т.А. Синюкина // Вісник ОДАБА. – Одесса, 2007. – № 27. – С.178-183.
5. Маилян Л.Р. Расчет статически неопределимых стержневых железобетонных систем: Учебное пособие. – Ростов н/Д: Рост. инж.-строит. ин-т, 1988. – 91 с.
6. Маилян Л.Р. Сопротивление железобетонных статически неопределимых балок силовым воздействиям. – Ростов-на-Дону: Издательство Ростовского университета, 1989. – 176 с.
7. Яременко А.Ф. О практическом способе определения жесткости железобетонных балок / А.Ф.Яременко, А.В.Ковров, Т.А.Синюкина // Вісник ОДАБА. – Одесса, 2005. – № 20. – С.389-394.
8. Модель деформирования изгибаемых железобетонных элементов / В.С.Дорофеев, А.В.Ковров, Р.Э.Чайковский, А.В.Ковтуненко, Т.А.Максимова // Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво). – Київ, ДП НДІБК, 2011 – Вип.74 кн.1. – С.336-343.