

УДК 624.012.45:624.023.87

д.т.н., профессор Колчунов В.И.,
к.т.н., доцент Яковенко И.А., Дмитренко Е.А.,
Национальный авиационный университет, м. Київ

АНАЛИТИЧЕСКАЯ И КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЕ СТЕРЖНЕВЫЕ МОДЕЛИ НЕЛИНЕЙНОЙ ЗАДАЧИ СЦЕПЛЕНИЯ АРМАТУРЫ С БЕТОНОМ, ИХ СРАВНЕНИЕ И АНАЛИЗ

Предложены аналитическая уточненная методика определения податливости (и секущей жесткости C_{sm}) арматурной связи, пересекающей трещину (λ_{sm} – существенного параметра, необходимого для моделирования работы железобетонных конструкций по модели дискретных трещин) и конечно-элементные стержневые модели с использованием программного комплекса Лира-САПР (упрощенная, трехэлементная и специальная модели сцепления). Определение податливости арматурной связи, пересекающей трещину, в зависимости от действующего усилия N_{sm} и перемещения U_{sm} осуществляется решением нелинейной краевой задачи в прикладном пакете системы компьютерной алгебры, представляющих закономерности деформирования бетона и арматуры, а также сцепления арматуры с бетоном. Закон сцепления принят упруго-пластический, билинейного характера, работа арматуры представлена упругой зависимостью (закон Гука), бетона – упруго-пластической зависимостью, который также описывает билинейная диаграмма. Полученные результаты наглядно свидетельствуют о нелинейном характере работы арматурной связи, пересекающей трещину, что соответствует действительной работе связи, однако для большей достоверности нуждаются в экспериментальном подтверждении.

Ключевые слова: аналитическая модель, конечно-элементная модель, стержневая модель, сцепление арматуры с бетоном.

Постановка проблемы. В железобетоне сцепление арматуры с бетоном обеспечивает совместную работу этих разномодульных материалов. Поэтому проблема сцепления арматуры с бетоном является основополагающей в сопротивлении железобетонных конструкций силовым и деформационным воздействиям. Этой проблеме уделяется большое внимание.

Анализ последних исследований и публикаций. Для решения различных задач, связанных со сцеплением арматуры с бетоном в нашей стране и за рубежом проведены обширные экспериментально-теоретические исследования. Однако анализ исследований в области сцепления арматуры с бетоном

свидетельствует о неоднозначности подходов к решению этой проблемы и об отсутствии единой теоретически обоснованной методики расчета [1–6].

Снижение связей сцепления арматуры с бетоном приводит к чрезмерному раскрытию трещин, увеличению податливости и снижению несущей способности конструкции [1]. Выяснение закономерности контакта бетона и арматуры при передаче растягивающих усилий через арматуру в условиях трещинообразования является одной из важнейших задач железобетона [2, 3].

Случай центрального армирования одним стержнем при выдергивании его из бетонной матрицы Наиболее полно раскрывает закономерность проявляющуюся при выдергивании арматурного стержня из бетонного блока (представительного объема в виде призмы с арматурным стержнем), которая является одной из важнейших задач строительной механики железобетона при наличии дискретных трещин [4, 5]. К этому случаю точно или приближенно сводятся все виды армирования железобетонных конструкций системой арматурных стержней [2, 3].

Процесс разрушения связей сцепления арматуры с бетоном при выдергивании арматурного стержня из бетонной матрицы представляет собой сложный многостадийный процесс, сопровождающийся присутствием неоднородного и неупругого деформирования, нарушением адгезионных связей, возникновением и развитием трещин различной формы и ориентации, наличием изменяющихся зон контакта. Для корректного решения данной задачи необходимо использовать достоверные аналитические модели, описывающие взаимодействие арматуры с бетоном, которое характеризуется силами сцепления [2, 3, 4].

Изложение основного материала. Аналитическая модель сцепления.

Силы сцепления, действующие по контакту арматуры с бетоном характеризуются погонными касательными усилиями $\tau_{bond}(x)$, в бетоне – по направлению действующей нагрузки, а в арматуре, – противоположно направленные [6].

Зависимость касательных напряжений сцепления $\tau_{bond}(x)$ от взаимных относительных смещений арматуры и бетона $\varepsilon_g(x)$, характеризующая сцепление материалов имеет билинейный характер и представлена ниже:

$$\tau_{bond} = k \cdot \varepsilon_g(x) = 0,4 \cdot E_{cm} \cdot (\varepsilon_s(x) - \varepsilon_c(x)), \quad (1)$$

$$\text{при } \varepsilon_g(x) = \varepsilon_s(x) - \varepsilon_c(x) \leq \varepsilon_g^*(x) = 4,95 \frac{f_{ctm}}{E_{cm}};$$

$$\tau_{bond}(x) = 0,0232 \cdot E_{cm} \cdot (\varepsilon_s(x) - \varepsilon_c(x)) + 1,866 \cdot f_{ctm}, \quad (2)$$

$$\text{при } \varepsilon_g(x) = \varepsilon_s(x) - \varepsilon_c(x) \leq \varepsilon_g^*(x) = 4,95 \frac{f_{ctm}}{E_{cm}},$$

где $\varepsilon_g(x)$ – граничное относительное взаимное смещение бетона и арматуры, соответствующее конечной точке первого участка диаграммы сцепления (рис. 2);

f_{ctm} – средний предел прочности бетона при растяжении [7];

E_{cm} – средний начальный модуль упругости бетона [7].

Работа бетона также описывается билинейной диаграммой $\sigma_c - \varepsilon_c$, представленной на рис. 3. Выражения для каждого из участков диаграммы имеют вид:

$$\varepsilon_c(x) = \begin{cases} \frac{N_c(x)}{E_{cm} \cdot A_c}, & \text{если } \frac{N_c(x)}{A_c} \leq 0,9 \cdot f_{ctm}, \\ \frac{18 \cdot N_c(x)}{E_{cm} \cdot A_c} - 15,3 \cdot \frac{f_{ctm}}{E_{cm}}, & \text{если } \frac{N_c(x)}{A_c} > f_{ctm}; \end{cases} \quad (3)$$

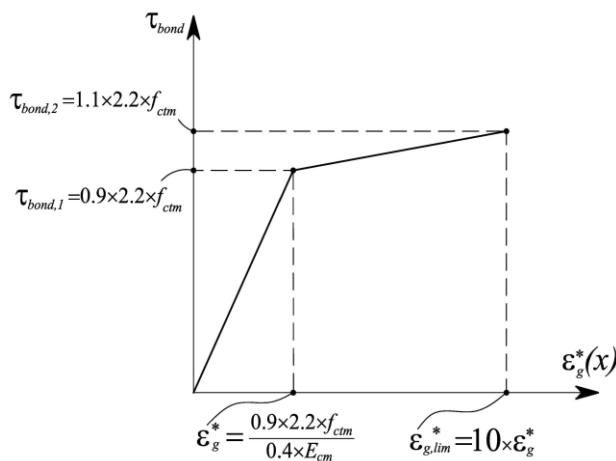


Рис. 1. Зависимость напряжений сцепления τ_{bond} от относительных взаимных смещений $\varepsilon_g^*(x)$

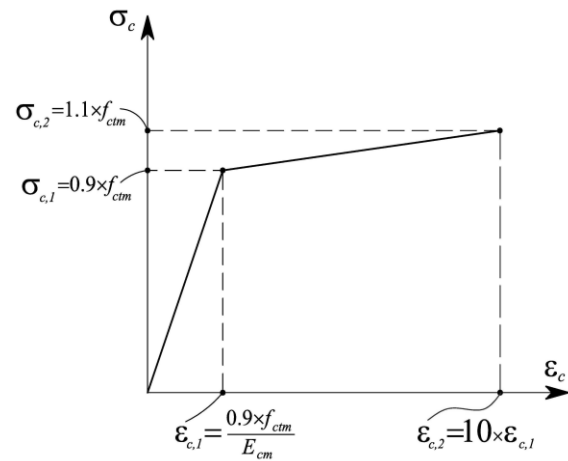


Рис. 2. Диаграмма деформирования бетона $\sigma_c - \varepsilon_c$ в аналитической модели

Для арматуры справедлив закон Гука – материал работает упруго.

Эти исходные предпосылки будут использованы в той или иной форме для моделирования задачи сцепления различными способами в ПК Лира- САПР, которые рассмотрим далее.

Аналитически стержневая модель сцепления железобетонного стержня (рис. 3) моделируется системой, состоящей из четырех уравнений, два из которых являются дифференциальными уравнениями (ДУ) первого порядка (краевая задача Коши).

Граничные условия задачи записываются в следующем виде:

$$N_c(x=1)=0, \quad N_s(x=1)=C. \quad (5)$$

Вывод уравнений системы и исходные предпосылки данной модели представлены в [6].

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_s(x) = \frac{1}{E_s \cdot A_s} \cdot N_s(x); \\ \varepsilon_c(x) = \begin{cases} \frac{N_c(x)}{E_{cm} \cdot A_c}, & \text{если } \frac{N_c(x)}{A_c} \leq 0,9 \cdot f_{ctm}, \\ \frac{18 \cdot N_c(x)}{E_{cm} \cdot A_c} - 15,3 \cdot \frac{f_{ctm}}{E_{cm}}, & \text{если } \frac{N_c(x)}{A_c} > f_{ctm}; \end{cases} \\ \frac{dN_s(x)}{dx} = \begin{cases} \pi \cdot d_s \cdot 0,4 \cdot E_{cm} \cdot [\varepsilon_s(x) - \varepsilon_c(x)], & \text{если } \varepsilon_g(x) \leq \varepsilon_g^*(x) = 4,95 \cdot \frac{f_{ctm}}{E_{cm}}, \\ \pi \cdot d_s \cdot \{0,0232 \cdot E_{cm} \cdot [\varepsilon_s(x) - \varepsilon_c(x)] + 1,866 \cdot f_{ctm}\}, & \text{если } \varepsilon_g(x) > \varepsilon_g^*(x) = 4,95 \cdot \frac{f_{ctm}}{E_{cm}}; \end{cases} \\ \frac{dN_c(x)}{dx} = \begin{cases} -\pi \cdot d_s \cdot 0,4 \cdot E_{cm} \cdot [\varepsilon_s(x) - \varepsilon_c(x)], & \text{если } \varepsilon_g(x) \leq \varepsilon_g^*(x) = 4,95 \cdot \frac{f_{ctm}}{E_{cm}}, \\ -\{0,0232 \cdot E_{cm} \cdot [\varepsilon_s(x) - \varepsilon_c(x)] + 1,866 \cdot f_{ctm}\}, & \text{если } \varepsilon_g(x) > \varepsilon_g^*(x) = 4,95 \cdot \frac{f_{ctm}}{E_{cm}}. \end{cases} \end{array} \right. \quad (4)$$

Данная задача решается с использованием численных методов в прикладном пакете системы компьютерной алгебры *Wolfram Mathematica*.

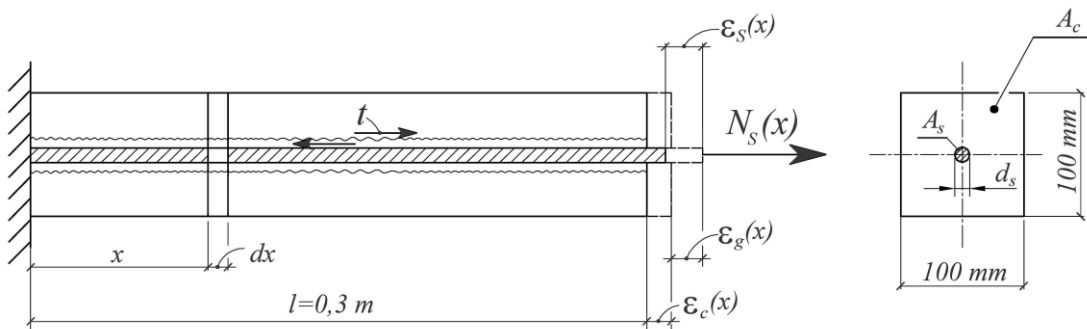


Рис. 3. Расчетная схема элемента в аналитической модели сцепления

Рассмотрим железобетонный элемент с одиночным центральным армированием. Элемент представляет собой призму длиной 0,6 м, по обоим торцам которой выпущена арматура на 0,1 м. К обоим концам арматурного стержня прикладывается растягивающее усилие N_s , выдергивающее арматуру из бетонной матрицы. Это усилие вызывает перемещения и деформации арматурного стержня $\varepsilon_s(x)$ и бетона железобетонного элемента $\varepsilon_c(x)$ по всей длине бруса. При этом в бетонной матрице возникает усилие $N_c(x)$ вследствие взаимодействия арматуры с бетоном в зоне контакта бруса и взаимные относительные смещения арматуры и бетона $\varepsilon_g(x)$. Элемент посередине имеет опору по вертикальной оси, а также опоры, работающие в горизонтальном направлении, расположенные на расстоянии, равном 60 мм от оси симметрии в каждую сторону (рис. 4).

плоской задачи сцепления с элементами сцепления, работающими на сдвиг (рис. 6).

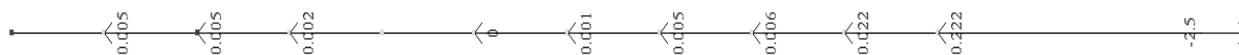


Рис. 6. Значения касательных усилий сцепления в κH (для правой части элемента)

Исходные данные для построения моделей, описанных в данной статье: модуль упругости арматуры класса А400С $E_s = 2,04 \times 10^5$ МПа, средний начальный модуль упругости бетона класса С16/20 $E_{cm} = 2,7 \times 10^4$ МПа; площадь поперечного сечения бетонной призмы $A_c = 0,01$ м²; продольное усилие на конце арматурного стержня $N_s = 0,025$ МН; средний предел прочности бетона призмы при растяжении $f_{ctm} = 1,9$ МПа, диаметр арматурного стержня Ø10А400С, длина железобетонной части стержня $L = 0,3$ м. Расчет описанной модели в ПК Лира-САПР позволяет получить графики распределения продольных усилий N_c , N_s и перемещений U_c и U_s в железобетонном стержне (см. рис. 9–13).

Трехэлементная модель сцепления. Данная модель, состоит из трех видов стержневых элементов, находящихся на одной оси:

- элемент, моделирующий работу бетона (физически нелинейный пространственный универсальный стержневой КЭ 210), разбитый участки длиной 30 мм (как и в упрощенной задаче). Жесткость задается как для бруса с учетом нелинейности основного материала, которая учитывается введением 14 кусочно-линейного закона деформирования бетона (рис. 2).

- элемент, моделирующий работу арматуры (универсальный стержневой КЭ 10), разбитый на участки длиной 30 мм в теле бетона. Каждый арматурный элемент смещен относительно узлов бетонных элементов на 5 мм по оси Ox в направлении растягивающего усилия, таким образом, что элементы, моделирующие работу арматуры на растяжение (рис. 5). Жесткость задавалась кругом Ø10 мм из соответствующего сортамента металлических сечений.

- элементы, моделирующие сцепление арматуры с бетоном, размещаются между узлами арматурных элементов, сдвинутых относительно бетонных на 5 мм. Они моделируются в двух вариантах – как упругий КЭ 10 и физически нелинейный КЭ 210 с введением 14 кусочно-линейного закона деформирования для основного материала (рис. 1). Сечение элемента квадратное – $1,5 \times 1,5$ см (принято из соображений учета периметра околоарматурного слоя, эквивалентного окружности Ø20 мм, в котором происходят процессы взаимодействия арматуры и бетона).

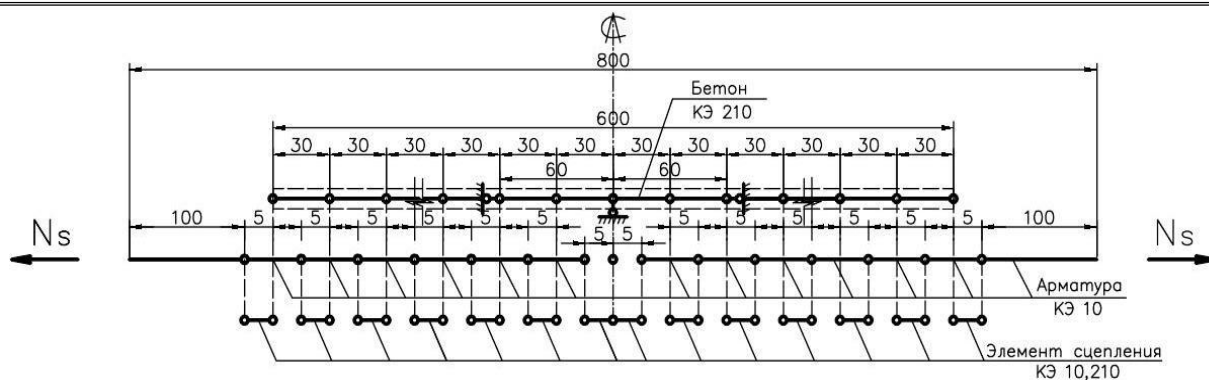


Рис. 7. Расчетная схема трехэлементной модели сцепления
(элементы модели условно смещены друг относительно друга для большей наглядности)

Ввиду того, что нагрузка подобрана достаточно большого значения – 25кН (для того, чтобы проанализировать работу материалов за пределами упругой стадии), элементы сцепления без введения армирующего материала в большинстве своём разрушались. Исходя из полученных результатов, было принято решение задать в жесткостях элементов сцепления армирующий материал через введение кусочно-линейной диаграммы деформирования материала как для арматуры класса А400С и распределенным армированием с процентом армирования $\mu = 5\%$.

По результатам расчета таких моделей (с физически линейными и нелинейными элементами сцепления) получены графики распределения усилий в бетоне N_c и арматуре N_s , касательных усилий сцепления $\tau_{bond}(x)$ и продольных деформаций в бетоне ε_c и арматуре ε_s .

Специальная модель сцепления. Специальная модель отличается от вышеописанных моделей тем, что она состоит из трех продольных стержней с введением поперечных стержней для моделирования связей сцепления. При этом бетонное сечение призмы "разделяется" на две симметричные половины, каждая из которых моделируется физически нелинейным стержнем КЭ 210. Они смещаются друг относительно друга на 10 мм. Между ними размещается физически линейный стержень КЭ10, моделирующий упругую работу арматуры. Бетонные и арматурные элементы разбиваются на участки длиной 30мм, так, что узлы элементов располагаются один над другим. Между узлами бетонных и арматурных элементов вводятся поперечные стержни КЭ 210 длиной 5 мм, моделирующие сцепление арматуры и бетона и работающие на сдвиг. К арматурному стержню, выходящему за пределы бетона с обеих сторон прикладывается растягивающая нагрузка N_s .

Для физически нелинейных бетонных элементов и элементов сцепления (КЭ 210) жесткости вводятся таким же образом, как и в трехэлементной модели. Процент армирования в элементах сцепления μ варьируется – принимается равным 0%; 3%; и 5%.

Схема расположения опор, осталась аналогичной, только несколько изменилась ввиду разделения бетона на два конечных элемента (рис. 8).

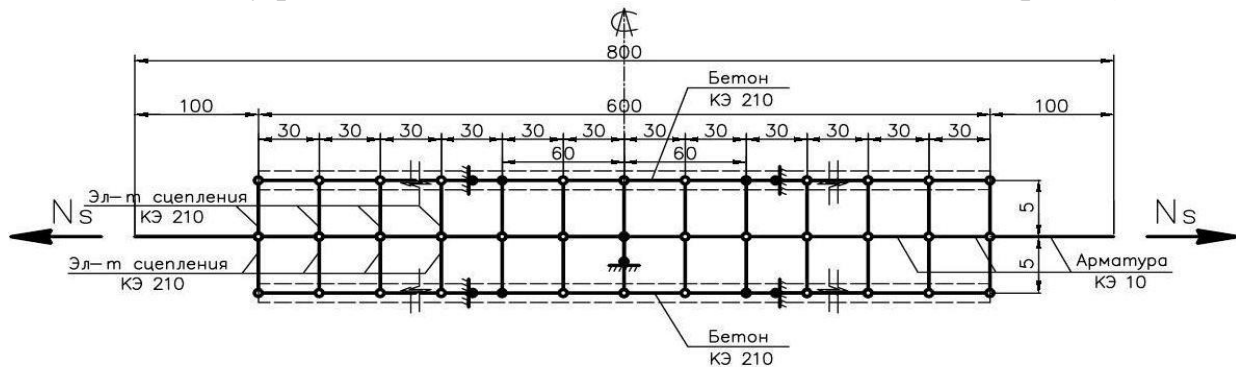


Рис. 8. Специальная модель сцепления

Использование представленной на рис. 8 модели, позволяет построить графики аналогичных зависимостей, что и для трехэлементной модели.

Графики распределения продольных усилий в арматуре $N_s(x)$ по длине стержня x и распределения относительных продольных деформаций в арматуре $\epsilon_s(x)$ представлены на рис. 9 и рис. 10, соответственно.

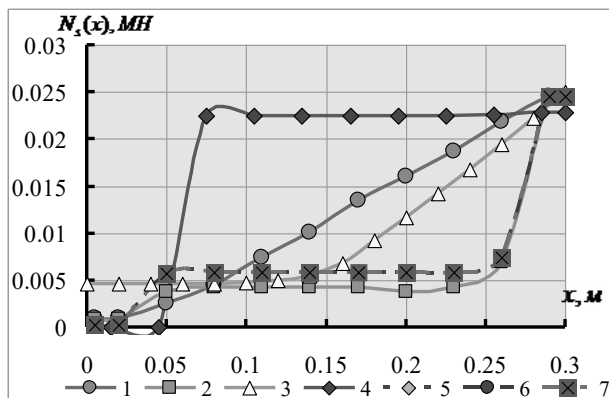


Рис. 9. Графики распределения продольных усилий в арматуре $N_s(x)$ по длине стержня x :

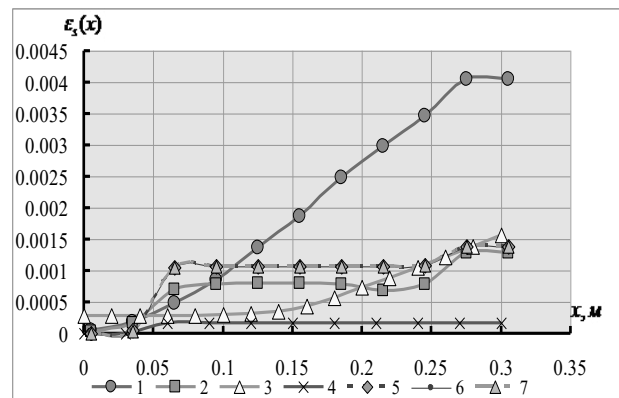


Рис. 10. Графики распределения относительных продольных деформаций в арматуре $\epsilon_s(x)$ по длине стержня x :

1 – трехэлементная одноосная модель (нелинейный бетон, нелинейное сцепление, упругая арматура); 2 – то же, что и 1 (нелинейный бетон, линейное сцепление, упругая арматура); 3 – аналитическая модель; 4 – упрощенная одноосная модель (упругий бетон и арматура, без дополнительных элементов сцепления); 5 – специальная модель с поперечными элементами сцепления при $\mu=5\%$; 6 – то же, что и 5 при $\mu=3\%$; 7 – то же, что и 5 при $\mu=0\%$ (без арматуры)

Кроме вышеприведенных зависимостей были построены графики распределения продольных усилий в бетоне $N_c(x)$ (рис. 11) и распределения относительных продольных деформаций в бетоне $\epsilon_c(x)$ (рис. 12) по длине стержня x .

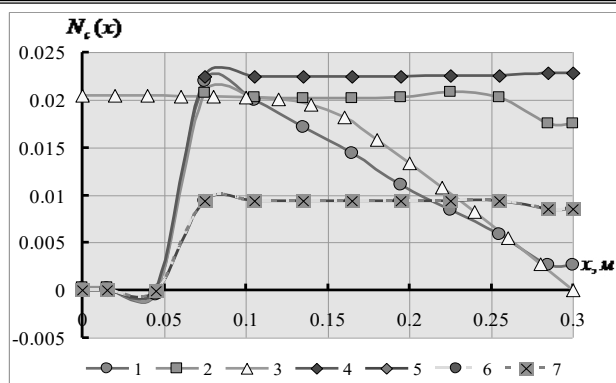


Рис. 11. Графики распределения продольных усилий в бетоне $N_c(x)$ по длине стержня x :

1 – трехэлементная одноосная модель (нелинейный бетон, нелинейное сцепление, упругая арматура); 2 – то же, что 1 (нелинейный бетон, линейное сцепление, упругая арматура); 3 – аналитическая модель; 4 – упрощенная одноосная модель (упругий бетон и арматура, без дополнительных элементов сцепления); 5 – специальная модель с поперечными элементами сцепления при $\mu=5\%$; 6 – то же, что 5 при $\mu=3\%$; 7 – то же, что 5 при $\mu=0\%$ (без арматуры)

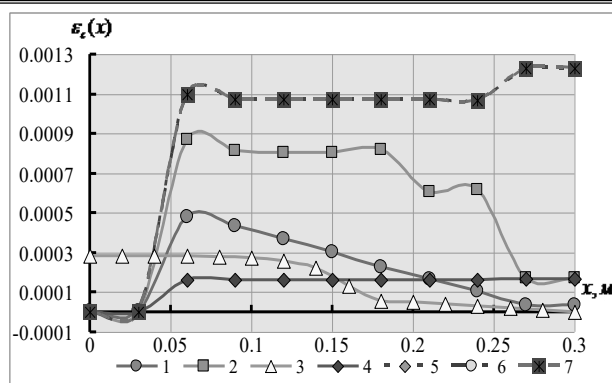


Рис. 12. Графики распределения относительных продольных деформаций в бетоне $\varepsilon_c(x)$ по длине стержня x :

Для исследования касательных сил сцепления $\tau_{bond}(x)$ по длине стержня x были построены графики (рис. 13) специальных моделей с поперечными элементами сцепления при варьировании процента армирования μ ; трехэлементные одноосные модели с нелинейным бетоном, нелинейным и линейным бетоном и упругой арматурой; аналитические модели при $0,4E_{cm}$ и $0,2E_{cm}$.

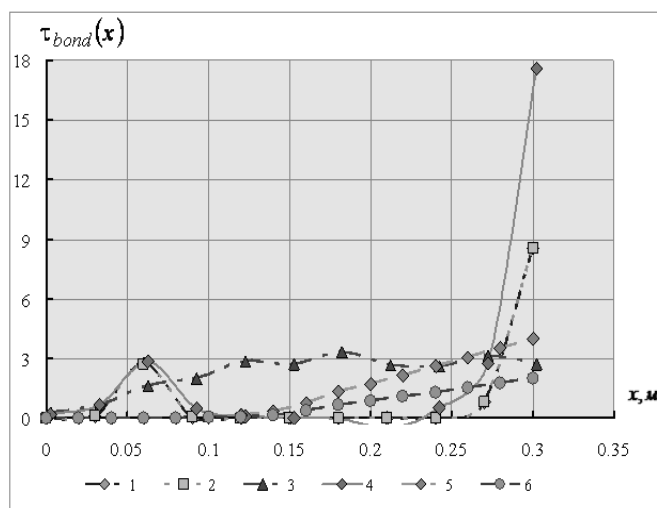


Рис. 13. Графики касательных сил сцепления $\tau_{bond}(x)$ по длине стержня x :

1 – специальная модель с поперечными элементами сцепления при $\mu=5\%$; 2 – то же, что 1, при $\mu=3\%$; 3 – трехэлементная одноосная модель (нелинейный бетон, нелинейное сцепление, упругая арматура); 4 – то же, что 3 (нелинейный бетон, линейное сцепление, упругая арматура); 5 – аналитическая модель, построенная при $0,4E_{cm}$; 6 – то же, что 5 при $0,2E_{cm}$

Выводы

1. С увеличением расстояния от заземленного торца железобетонной призмы x , продольная сила $N_s(x)$ в выдерживаемом арматурном стержне

увеличивается равномерно для трехэлементной одноосной модели, учитывающей упруго-пластическую работу бетона, нелинейное сцепление и упругую работу арматуры (принятую в дальнейшем для анализа в качестве эталона для процентного сравнения);

– для кривой, учитывающей линейное сцепление значение продольной силы $N_s(x)$ остается постоянным почти на всем участке изменения x , т. е. от 0,05 до 0,25 м, но резко увеличивается на последнем участке от 0,25 м до 0,3 м (максимальное расхождение составляет до 300% в сторону уменьшения);

– для аналитической модели характерным является постоянство на первой половине участка изменения x , а во второй половине призмы наблюдается увеличение градиента возрастания продольной силы $N_s(x)$ (максимальное расхождение составляет до 32%);

– упрощенная одноосная модель, учитывающая упругую работу бетона без дополнительных элементов сцепления резко возрастает на первой четверти исследуемого участка, а на остальных трех четвертях участка изменения x остается постоянной (максимальное расхождение составляет до 300% в сторону увеличения);

– варьирование процента армирования поперечных элементов сцепления при $\mu=0\%$, $\mu=3\%$ и $\mu=5\%$ для кривых, построенных для специальных моделей не оказывают какого-либо влияния на исследуемую зависимость – все три кривые накладываются друг на друга на всем исследуемом участке, при этом они параллельны кривой (максимальное расхождение составляет 15%), учитывающей линейное сцепление, упругую работу арматуры и упруго-пластическую работу бетона (максимальное расхождение составляет 265%).

2. С увеличением расстояния от защемленного торца железобетонной призмы x , относительные продольные деформации в арматуре $\varepsilon_s(x)$ увеличивается равномерно для трехэлементной одноосной модели, учитывающей упруго-пластическую работу бетона, нелинейное сцепление и упругую работу арматуры (принятую в дальнейшем для анализа в качестве эталона для процентного сравнения);

– для кривой, учитывающей линейное сцепление значение относительных продольных деформаций в арматуре $\varepsilon_s(x)$ остается постоянным почти на всем участке изменения x , т. е. от 0,05 до 0,25 м, но плавно увеличивается на последнем участке от 0,25 м до 0,3 м (максимальное расхождение составляет до 270% в сторону уменьшения);

– для аналитической модели характерным является постепенное плавное увеличение градиента возрастания продольных деформаций в арматуре $\varepsilon_s(x)$ вогнутого характера (максимальное расхождение составляет до 255%);

– упрощенная одноосная модель, учитывающая упругую работу бетона без дополнительных элементов сцепления возрастает на первой шестой части исследуемого участка, а на остальных пяти шестых участка изменения x остается постоянной (максимальное расхождение составляет до 800% в сторону уменьшения);

– варьирование процента армирования поперечных элементов сцепления при $\mu=0\%$, $\mu=3\%$ и $\mu=5\%$ для кривых, построенных для специальных моделей не оказывают какого-либо влияния на исследуемую зависимость – все три кривые накладываются друг на друга на всем исследуемом участке, при этом они параллельны кривой (максимальное расхождение составляет 25%), учитывающей линейное сцепление, упругую работу арматуры и упруго-пластическую работу бетона (максимальное расхождение составляет 335%).

3. С увеличением расстояния от заземленного торца железобетонной призмы x , продольная сила $N_c(x)$ в бетоне резко увеличивается на первой пятой участка изменения x , однако на оставшемся участке (четыре пятых длины участка изменения x) продольная сила $N_c(x)$ в бетоне равномерно уменьшается для трехэлементной одноосной модели, учитывающей упруго-пластическую работу бетона, нелинейное сцепление и упругую работу арматуры (принятую в дальнейшем для анализа в качестве эталона для процентного сравнения);

– для кривой, учитывающей линейное сцепление, значение продольной силы $N_c(x)$ в бетоне совпадает на первой пятой участка изменения x и остается постоянным почти на всем участке изменения x , т. е. от 0,075 до 0,25 м, но убывает на последнем участке от 0,25 м до 0,3 м (максимальное расхождение составляет до 300% в сторону уменьшения);

– для аналитической модели характерным является постоянство на первой третьей части участка изменения x , а на остальных двух третях длины участка изменения x наблюдается убывание градиента уменьшения продольной $N_c(x)$ в бетоне (максимальное расхождение с кривой составляет до 18%);

– упрощенная одноосная модель, учитывающая упругую работу бетона без дополнительных элементов сцепления аналогична кривой, построенной для трехэлементной одноосной модели, учитывающей упруго-пластическую работу бетона, нелинейное сцепление и упругую работу арматуры на первой пятой участка изменения x , однако на оставшемся участке (четыре пятых длины участка изменения x) продольная сила $N_c(x)$ в бетоне остается постоянной (максимальное расхождение составляет 950% раз в сторону увеличения);

– варьирование процента армирования поперечных элементов сцепления при $\mu=0\%$, $\mu=3\%$ и $\mu=5\%$ для кривых, построенных для специальных моделей сцепления не оказывают какого-либо влияния на исследуемую зависимость – все три кривые накладываются друг на друга на всем исследуемом участке, при

этом они паралельны кривой (максимальное расхождение составляет до 200%), построенной для трехэлементной одноосной модели, учитывающей линейное сцепление, упругую работу арматуры и упруго-пластическую работу бетона (максимальное расхождение составляет 220%).

4. С увеличением расстояния от заземленного торца железобетонной призмы x , относительные продольные деформации в бетоне $\varepsilon_c(x)$ резко увеличиваются на первой пятой участка изменения x , однако на оставшемся участке (четыре пятых длины участка изменения x) относительные продольные деформации в бетоне $\varepsilon_c(x)$ равномерно уменьшаются для трехэлементной одноосной модели, учитывающей упруго-пластическую работу бетона, нелинейное сцепление и упругую работу арматуры (принятую в дальнейшем для анализа в качестве эталона для процентного сравнения);

– для кривой, учитывающей линейное сцепление, значение относительных продольных деформаций в бетоне $\varepsilon_c(x)$ практически совпадает на первой пятой участка изменения x и скачкообразно убывает на оставшемся участке изменения x (максимальное расхождение составляет до 400%);

– для аналитической модели характерным является постоянство на первых двух пятых частях участка изменения x , а на остальных трех пятых частях длины участка изменения x наблюдается убывание градиента уменьшения относительных продольных деформаций в бетоне $\varepsilon_c(x)$ (максимальное расхождение составляет до 40%);

– упрощенная одноосная модель, учитывающая упругую работу бетона без дополнительных элементов сцепления возрастает на первой пятой части изменения x , а на оставшемся участке остается постоянной (максимальное расхождение составляет 150%);

– варьирование процента армирования поперечных элементов сцепления при $\mu=0\%$, $\mu=3\%$ и $\mu=5\%$ для кривых, построенных для специальных моделей сцепления не оказывают какого-либо влияния на исследуемую зависимость – все три кривые накладываются друг на друга на всем исследуемом участке, при этом они паралельны кривой (максимальное расхождение составляет до 600%), построенной для трехэлементной одноосной модели, учитывающей линейное сцепление, упругую работу арматуры и упруго-пластическую работу бетона в середине участка изменения длины x (максимальное расхождение составляет до 12 раз).

5. С увеличением расстояния от заземленного торца железобетонной призмы x , касательные силы сцепления $\tau_{bond}(x)$ увеличиваются скачкообразно для трехэлементной одноосной модели, учитывающей упруго-пластическую работу бетона, нелинейное сцепление и упругую работу арматуры (принятую в дальнейшем для анализа в качестве эталона для процентного сравнения);

– для кривой, учитывающей линейное сцепление значение касательных сил сцепления $\tau_{bond}(x)$ остается постоянным и приближается к нулю почти на всем участке изменения x , т. е. от 0,05 до 0,25 м, но резко увеличивается на последнем участке от 0,25 м до 0,3 м (максимальное расхождение составляет до 580% в сторону увеличения);

– для аналитической модели, построенной при $0,4E_{cm}$, характерным является ее приближение к нулю на первой половине участка изменения x , а на второй половине кривая плавно и линейно возрастает (максимальное расхождение до 300% в сторону уменьшения);

– для аналитической модели, построенной при $0,2E_{cm}$, наблюдается та же тенденция линейного плавного возрастания на второй половине участка изменения x (максимальное расхождение составляет до 430% в сторону уменьшения);

– варьирование процента армирования поперечных элементов сцепления при $\mu=3\%$ и $\mu=5\%$ для кривых, построенных для специальных моделей не оказывают какого-либо влияния на исследуемую зависимость – обе кривые накладываются друг на друга на всем исследуемом участке, при этом они параллельны кривой (максимальное расхождение составляет до 100%), учитывающей линейное сцепление, упругую работу арматуры и упруго-пластическую работу бетона (максимальное расхождение составляет до 190%).

Список литературы

1. Белов В.В. Диахронная модель деформирования коррозионно-поврежденных железобетонных элементов с трещинами / В. В. Белов, С. Е. Никитин // Вестник гражданских инженеров. – 2011. – №4. – С. 18–25.
2. Бондаренко В.М. Расчетные модели силового сопротивления железобетона : монография / В.М. Бондаренко, В.И. Колчунов. – М. : Издательство АСВ, 2004. – 472с.
3. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона : монография / Н.И. Карпенко. – М. : Стройиздат, 1996. – 416с.
4. Левин В.М. Математическое моделирование совместного деформирования арматурного стержня и бетона в окрестности изолированной трещины (применительно к модели дискретных трещин) / В. М. Левин, Н. Ю. Рогожин // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2015. – №3(113). – С. 5–7.
5. Холмянский М.М. Контакт арматуры с бетоном : монография / М. М. Холмянский. – М. : Стройиздат, 1981. – 184с.
6. Kolchunov V.I. The analytical core model formation of the nonlinear problem bond armature with concrete / V. I. Kolchunov, I. A. Yakovenko, E. A. Dmitrenko // Збірник наукових праць. Серія галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава : ПолтНТУ, 2016. – Вып. 2(47).
7. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення : ДБН В.2.6-98:2009. – [Чинний з 2011-06-01]. – К. : Мінеріонбуд України, 2011. – 71 с. – (Державні будівельні норми).

Анотація

Запропоновано аналітичну уточнену методику визначення податливості (січної жорсткості C_{sm}) арматурного зв'язку, який перетинає тріщину (λ_{sm} – істотного параметра, необхідного для моделювання роботи залізобетонних конструкцій за моделлю дискретних тріщин) і скінченно-елементні стрижневі моделі з використанням програмного комплексу Ліра-САПР (спрощена, трьохелементна і спеціальна моделі зчеплення). Визначення податливості арматурного зв'язку, який перетинає тріщину, в залежності від діючого зусилля N_{sm} і переміщення U_{sm} здійснюється рішенням нелінійної крайової задачі в прикладному пакеті системи комп'ютерної алгебри, що дозволяє використовувати закономірності деформування бетону і арматури, а також зчеплення арматури з бетоном. Закон зчеплення прийнятий пружно-пластичний, білінійного характеру, робота арматури представлена пружною залежністю (закон Гука), бетону – пружно-пластичною залежністю, який також описує білінійна діаграма. Отримані результати наочно свідчать про нелінійний характер роботи арматурного зв'язку, який перетинає тріщину, що відповідає дійсній роботі зв'язку, проте для більшої достовірності потребують експериментального підтвердження.

Ключові слова: *аналітична модель, скінченно-елементна модель, стрижнева модель, зчеплення арматури з бетоном.*

Abstract

It is proposed analytical refined method of determining pliability (and secant rigidity C_{sm}) reinforcing ties, crossing crack (λ_{sm} is essential parameter required for simulation of reinforced concrete constructions on the model of discrete cracks) and finite element core model using software system Lira-CAD (simplified, three-element and special bond model). Determination of pliability reinforcing ties that crosses a crack, depending on the existing efforts N_{sm} and displacement U_{sm} by decision of nonlinear boundary value problem in the application package of computer algebra systems, representing deformation concrete and armature, bond armature with concrete. Bond act adopted elastic-plastic, bilinear character reinforcement work is presented the dependence of the elastic (Hooke's law), concrete – elastic-plastic addiction, which also describes the bilinear diagram. The results clearly demonstrate the non-linear nature of the work of reinforcing ties that crosses a crack, which corresponds to the actual operation of the communication, but for greater reliability require experimental confirmation.

Keywords: *analytical model, finite element model, rod model, bond armature with concrete.*