

Моделирование взаимодействия арматуры с бетоном с учетом нелинейного деформирования контактного слоя

На основе реализации метода конечного элемента построена численная модель взаимодействия арматуры с бетоном, учитывающая нелинейное деформирование в области контактного слоя. Сравнение полученных результатов с экспериментальными данными для высокопрочной проволоки показало их приемлемую сходимость при эксплуатационных нагрузках.

Ключевые слова: сцепление арматуры с бетоном, механические характеристики контактного слоя, численное моделирование.

Анализ механического взаимодействия арматуры с бетоном представляет собой сложную и до конца не решенную проблему. Поэтому при изменении либо геометрических, либо механических параметров заделки арматуры в бетон необходимо проводить многочисленные натурные испытания.

М.М. Холмянским [1] была предложена упрощенная математическая модель, описывающая взаимодействие арматуры с бетоном, на основе которой была создана техническая теория сцепления арматуры с бетоном. При этом для описания работы контактного слоя во всем диапазоне деформаций была использована зависимость касательных усилий сцепления $\tau_{\text{сц}}$ от взаимных продольных смещений бетона и арматуры g :

$$\tau_{\text{сц}} = B \frac{\ln(1 + \alpha g)}{1 + \alpha g}. \quad (1)$$

Параметры α и B зависят от профиля и диаметра арматуры, механических характеристик бетона, скорости приложения нагрузки и некоторых других факторов. Данные характеристики получены для различных типов арматур и классов бетонов на основе обработки многочисленных экспериментальных данных, поэтому они могут быть использованы при построении других моделей взаимодействия арматуры с бетоном.

Использование метода конечного элемента при построении математических моделей существенно расширяет возможности исследования поставленной проблемы [2, 3, 4]. При этом в качестве критерия правильности выбранных параметров модели необходимо использовать экспериментальные данные.

В нашей работе предлагается на основании экспериментальных данных по выдергиванию арматуры из бетонной призмы и расчетов с помощью метода конечного элемента смоделировать процессы, происходящие в зоне сцепления бетона и арматуры: ползучесть и пластическую деформацию бетона, деструкцию (разрушение) контактного слоя и проскальзывание арматуры. Рассмотрим эти процессы по отдельности, а кривую деформирования бетона представим в виде трехлинейной диаграммы (рис. 1).

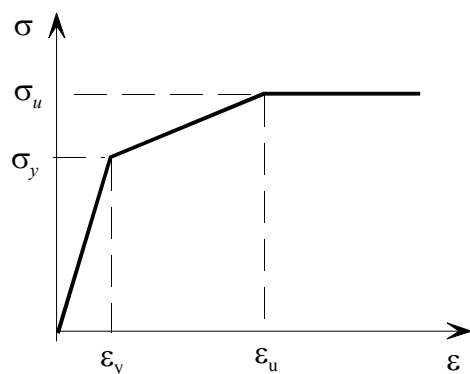


Рис. 1. Трехлинейная диаграмма деформирования бетона в зоне контакта

$$\sigma = \begin{cases} E_b \varepsilon & \text{при } \varepsilon \leq \varepsilon_y, \\ \sigma_y + E_{th} \left(\varepsilon - \frac{\sigma_y}{E_b} \right) & \text{при } \varepsilon_y < \varepsilon \leq \varepsilon_u, \\ \sigma_u & \text{при } \varepsilon > \varepsilon_u, \end{cases} \quad (2)$$

где σ , ε – интенсивности напряжений и деформаций соответственно; E_b – модуль упругости; E_{th} – касательный модуль; σ_y – предел текучести бетона; σ_u , ε_u – напряжения и деформации, соответствующие потере сцепления.

Деформации ползучести и пластичности имеют одинаковую природу, и если исключить параметр времени, то их можно описать одним уравнением состояния (формула (2)). Данные деформации и этап накопления повреждений в контактном слое соответствуют ветви упрочнения, реализующейся в диапазоне нагружения $\varepsilon_y \leq \varepsilon \leq \varepsilon_u$. При достижении деформацией ε предельного значения ε_u сцепление арматуры и бетона нарушается и начинается процесс проскальзывания.

Такое представление связи деформаций и напряжений позволяет в первом приближении учесть как наличие больших деформаций, так и разрушения в области взаимодействия арматуры с бетоном. В этом случае при математическом моделировании данной задачи необходимо выбрать только три независимых параметра: σ_y , σ_u , E_{th} . Для обоснования выбора величины этих характеристик будем использовать в качестве граничных условий экспериментальные данные о перемещении арматуры, заделанной в бетон. Для этого можно использовать связь характеристик сцепления α и B с напряжением σ_0 и продольным смещением g_0 конца арматуры [1]:

$$g_0 = \frac{1}{\alpha} \left[\exp \left(\frac{\sigma_0}{k} \right) - 1 \right], \quad k = \sqrt{\frac{BE_s p}{A_s \alpha (1 + n\mu)}}, \quad (3)$$

где p – периметр сечения арматурного стержня; $n = E_s / E_b$; E_s и E_b – модули упругости арматуры и бетона соответственно; $\mu = A_s / A_{bt}$; A_s и A_{bt} – площади сечения арматуры и бетона соответственно.

По зависимости g_0 и σ_0 , полученной по результатам численного расчета, можно осуществить подбор значений параметров нормального закона сцепления α и B . Анализируя численные и экспериментальные значения этих параметров можно связать параметры α и B с механическими характеристиками контактного слоя: σ_y , σ_u , E_{th} .

Рассмотрим задачу выдергивания высокопрочной проволоки из длинной бетонной призмы (рис. 2). Выбор такой задачи обусловлен несколькими причинами: характеристики нормального закона сцепления приведены в [1]; такая арматура имеет относительно гладкий профиль, что наиболее соответствует предлагаемой модели деформирования; задача является осесимметричной.

Чтобы в первом приближении оценить адекватность моделирования процессов, происходящих в контактном слое, была принята упрощенная модель деформирования с идеальным скольжением $\sigma_u = \sigma_y$, $E_{th} = 0$ (рис. 3) и характеристиками, соответствующими бетону класса В40: модуль упругости $E_b = 3,25 \cdot 10^4$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu_b = 0,2$. Стальная арматура во всем расчетном диапазоне нагрузок моделировалась изотропным упругим материалом со следующими механическими характеристиками: $E_s = 2 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu_s = 0,3$.

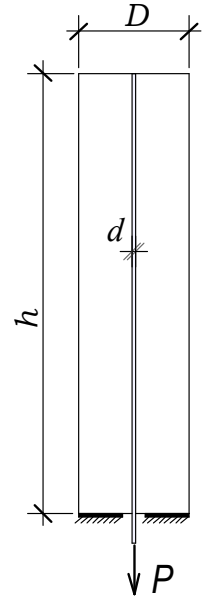


Рис. 2. Расчетная схема образца

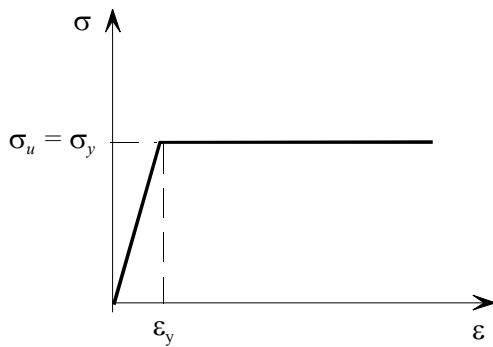


Рис. 3. Диаграмма идеального скольжения в зоне контакта

По осевому направлению размеры всех элементов выбирались одинаковыми. Решение задачи строилось с применением обычного итерационного метода Ньютона — Рафсона при постановке больших пластических деформаций. На рис. 4 показан фрагмент конечно-элементной сетки в деформированном состоянии.

При выдергивании арматуры из бетона по схеме, показанной на рис. 2, контактный слой находится в объемном напряженном состоянии. На каждый малый элемент действуют сжимающие продольные, окружные и радиальные напряжения. По-

Расчет и анализ полученных результатов выполнялись с использованием программного комплекса COSMOS/M. Параметры сетки конечных элементов были подобраны с учетом больших градиентов деформаций в радиальном направлении и условия сходимости физически нелинейной задачи. В зоне контакта бетона и арматуры радиальный размер конечного элемента принимался минимальным. Ближе к внешней поверхности он увеличивался в десять раз.

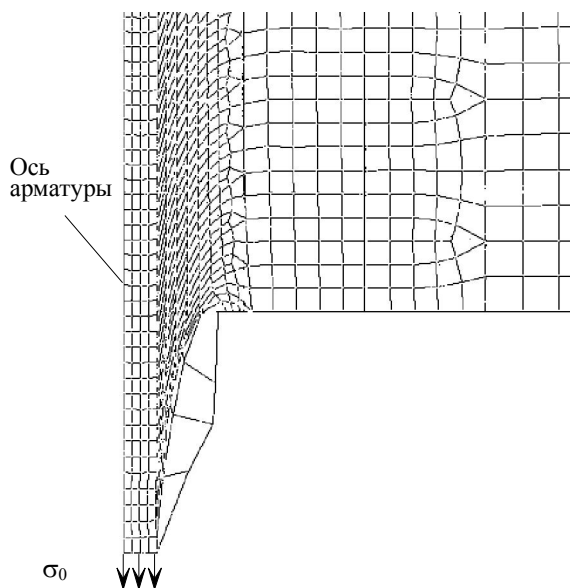


Рис. 4. Деформированное состояние фрагмента конечно-элементной сетки

этому в качестве критерия перехода материала контактного слоя в нелинейную стадию деформирования использовалось известное условие Мизеса, где учитываются все три главных напряжения $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 = 2\sigma_u^2. \quad (4)$$

По экспериментальным данным В.М. Кольнера [1] известно, что стадия скольжения начинается при $\tau_{\text{сц}} \approx 0,2B$. Если использовать критерий (4) для описания перехода контактного слоя в стадию скольжения, то связь характеристик $\tau_{\text{сц}}$ и σ_u можно записать следующим образом:

$$\tau_{\text{сц}} \approx 0,58\sigma_u, \quad \sigma_u \approx 0,34B. \quad (5)$$

Для высокопрочной проволоки диаметром 3 мм с учетом того, что $17,5 \leq B \leq 34$ МПа [1], напряжения σ_u будут меняться в диапазоне от 6 до 11,7 МПа. При проведении модельных расчетов напряжение σ_u , соответствующее проскальзыванию арматуры, задавалось равным 11 МПа.

Были построены конечно-элементные модели для двух диаметров стальной арматуры 3 и 6 мм. Расчет проводился в диапазоне нагрузок, соответствующих $0 < \sigma_0 < 1\,200$ МПа.

На рис. 5 представлены данные численного анализа: темные точки соответствуют диаметру арматуры 3 мм, светлые точки – диаметру 6 мм, а также результаты, рассчитанные по формулам (3): кривая 1 соответствует диаметру 3 мм, кривая 2 – диаметру 6 мм. На графиках можно выделить три характерных участка.

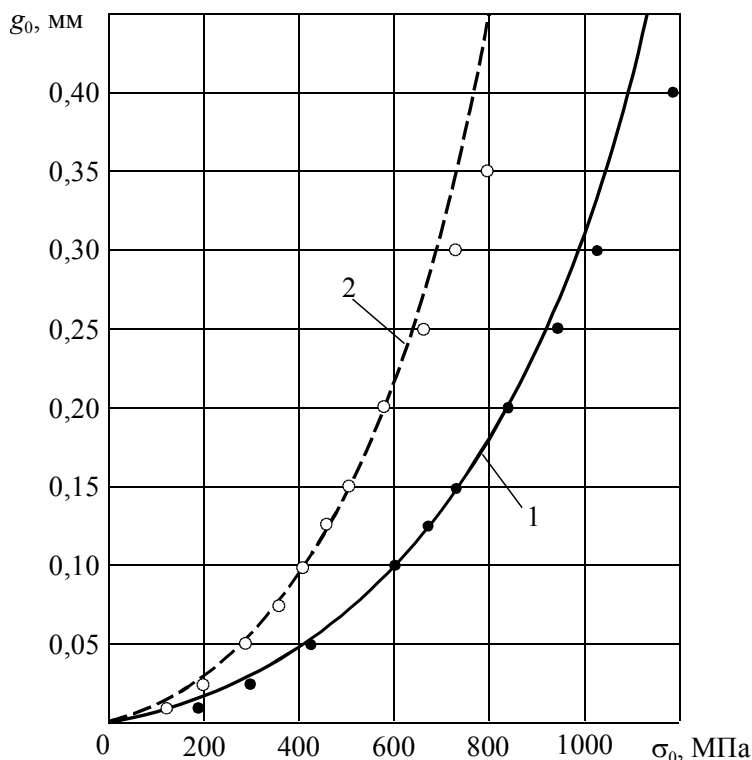


Рис. 5. Сравнительная оценка результатов исследований

На участках кривых с малым смещением ($0 < g_0 < 0,05$ мм) и большим смещением ($g_0 > 0,25$ мм) конца арматуры численные результаты отличаются от данных, учитывающих нормальный закон сцепления.

На участке, где $0,05 < g_0 < 0,25$ мм, наблюдается наибольшее совпадение значений при параметрах сцепления $\alpha = 320 \text{ см}^{-1}$ и $B = 21,8 \text{ МПа}$, одинаковых при моделировании выдергивания гладкой арматуры диаметром как 3 мм, так и 6 мм. Эти значения попадают в диапазон изменений эталонных параметров α_0 и B_0 , определенных В.М. Кольнером на основе многочисленных экспериментальных исследований. Данный участок кривой характеризует возникновение нелинейных деформаций без нарушения сцепления и соответствует эксплуатационным характеристикам конструкций.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- построена численная модель взаимодействия арматуры с бетоном с учетом нелинейного деформирования в области контактного слоя;
- сравнение полученных результатов с экспериментальными данными для высокопрочной проволоки показало их приемлемую сходимость в области возникновения нелинейных деформаций в контактном слое без нарушения сцепления;
- параметры нормального закона сцепления α и B , определенные для разных диаметров арматуры, оказались одинаковыми.

Следовательно, созданная модель деформирования контактного слоя достаточно адекватно описывает процесс взаимодействия арматуры с бетоном в рассмотренном диапазоне смещений арматуры.

Библиографический список

1. Холмянский М.М. Бетон и железобетон. Деформативность и прочность. М.: Стройиздат, 1997. 569 с.
2. Groot A.K. Numerical modeling of bond-slip behavior // HERON reports. 1981. Vol. 26. № 1B. P. 8–89.
3. Тихомиров В.М., Астахов Ю.В. Экспериментально-расчетное исследование взаимодействия стальной и базальтопластиковой арматуры с бетоном // Изв. вузов. Строительство. 2010. № 11. С. 128–137.
4. Бенин А.В. Нелинейное взаимодействие арматуры и бетона железобетонных пластин // Строительная механика и расчет сооружений. 2006. № 2. С. 22–26.

V.M. Tikhomirov, Yu.V. Astakhov, O.V. Levina. Modeling of the Interaction of Fiber Reinforcement with Concrete with Allowance for the Non-linear Deformation of Contact Layer. A numerical model for the interaction of fiber reinforcement with concrete based on using the finite-element method is proposed. The model takes into account the non-linear deformation arising in the region of the contact layer. Through a comparison of calculation results with experimental data obtained for high-strength fibers, good convergence of the results under normal operating loads is demonstrated.

Keywords: *adhesion of fiber reinforcement with concrete, mechanical characteristics of contact layer, numerical modeling.*

Тихомиров Виктор Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры «Строительная механика» СГУПС. Область научных интересов: механика деформируемого тела. E-mail: twm@stu.ru

Астахов Юрий Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Здания, строительные конструкции и материалы» СГУПС. Область научных интересов: железобетонные строительные конструкции.

Левина Ольга Валерьевна – старший преподаватель кафедры «Здания, строительные конструкции и материалы» СГУПС, аспирант кафедры «Строительная механика». Область научных интересов: железобетонные строительные конструкции.