Для того чтобы максимальная сила гидроцилиндра не превышала максимальную силу деформации образца при $\Delta l_0 > \Delta l_{01}$, необходимо выполнение условия

$$c_y \le -c_{14} \text{ или } c_y \le |c_{14}| \tag{12}$$

Таким образом, жесткость упругих элементов можно выбирать в соответствии с (11), (12). Наиболее рациональным следует считать значение $c_y = |c_{14}|$, так как оно требует наибольшего перемещения поршня гидроцилиндра при получении ниспадающей ветви диаграммы, что обеспечивает более высокую точность контроля деформации образца.

Из вышеизложенного следует, что машины для получения полновесных диаграмм деформирования бетона могут создаваться на базе существующего оборудования, не обладающего достаточной жесткостью, путем применения упругих элементов регулируемой высоты, деформируемых вместе с образцом. При этом жесткость упругих элементов выбирается по модулю близкой к жесткости образца на ниспадающей ветви диаграммы, а начальная высота меньше начальной высоты образца на величину деформации, соответствующей пику нагрузки.

УДК 624.012.35.-033.32

Тур В.В., Шалобыта Т.П.

ПРИМЕНЕНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТА ИЗГИБАЕМЫХ СБОРНО-МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНОЙ РАБОТЫ СВЯЗЕЙ СДВИГА

Расчет железобетонных конструкций в соответствии с положениями деформационной модели [1], внесенной в качестве основной расчетной модели в проект норм [2], позволяет отказаться от целого ряда условностей и производить расчет сборно-монолитных конструкций на всех этапах их работы при любой компоновке составного сечения и произвольной системе действующих сил. Вместе с тем, принятая в [2] гипотеза о сплошности стыкового соединения и оценка прочности контакта как отдельно взятого элемента, а не в составе сборно-монолитной конструкции в целом, не позволяет повысить точность производимых расчетов [3–5]. Определение напряженно-деформированного состояния как стыкового соединения, так и в целом сборно-монолитного сечения, может быть в простейшей постановке выполнено при модификации теории составных стержней с учетом нелинейного поведения как составляющих элементов (деформационная расчетная модель для сечения), так и связей сдвига (деформационная модель для контакта). В общем случае при расчете сборно-монолитных изгибаемых конструкций на базе положений деформационной модели согласно [2], с учетом нелинейного поведения связей сдвига следует использовать систему разрешающих уравнений вида:

$$\begin{cases} \dfrac{d\varphi}{dx} = \dfrac{V_{sd,x} - \tau_{Rd,j}\cdot b_j\cdot\left(\dfrac{B_{1,2(m)}}{B_{1,1(m)}} - \dfrac{B_{1,2(s)}}{B_{1,1(s)}}\right)}{B_{2,2(m)} + B_{2,2(s)} - \left(\dfrac{B^2_{1,2(m)}}{B_{1,1(m)}} + \dfrac{B^2_{1,2(s)}}{B_{1,1(s)}}\right)}, \\ \dfrac{d\varepsilon_1}{dx} = \dfrac{\tau_{Rd,j}\cdot b_j}{B_{1,1(m)}} - \dfrac{B_{1,2(m)}}{B_{1,1(m)}}\cdot\dfrac{d\varphi}{dx} \\ \dfrac{d\varepsilon_2}{dx} = -\dfrac{\tau_{Rd,j}\cdot b_j}{B_{1,1(s)}} - \dfrac{B_{1,2(s)}}{B_{1,1(s)}}\cdot\dfrac{d\varphi}{dx} \\ \dfrac{d\tau_{Rd,j}\cdot b_j}{dx} = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)\cdot k'_t \end{cases} \tag{1}$$

где: $\tau_{Rd,j}$ – текущие значения касательных напряжений в стыковом соединении; b_j – расчетная ширина стыкового соединения в рассматриваемом сечении x по длине балки; $B_{1,1(m)}$, $B_{1,2(m)}$, $B_{2,2(m)}$ – элементы матрицы мгновенных жесткостей согласно [6] для монолитной части сечения, определяемые относительно оси, проходящей в плоскости контакта; $B_{1,1(s)}$, $B_{1,2(s)}$, $B_{2,2(s)}$ – элементы матрицы мгновенных жесткостей для сборной части сечения, определяемые относительно той же оси; ε_1, ε_2 –относительные продольные деформации соответственно монолитной и сборной частей сечения на уровне продольной оси, располагаемой в плоскости контакта; φ – кривизна сборно-монолитного сечения; $V_{sd,x}$ – расчетная поперечная сила в сечении x по длине контакта, соответствующая рассматриваемому уровню нагружения; $k'_t = d\tau_{Rd,j}/d\delta_t$ – текущее значение коэффициента сдвиговой жесткости для стыкового соединения, определяемое в зависимости от уровня нагружения и конструкции стыкового соединения.

В зависимости от конструкции стыка текущее значение коэффициента сдвиговой жесткости k'_t следует определять:

–для армированных стыков с деформируемыми вертикальными связями ($0 < r_n < \infty$):

$$k'_t = \frac{\xi + \xi\dfrac{r_n}{k_n}}{1 + \xi\dfrac{r_n}{k_n}}\,k'_{t0}, \tag{2}$$

– для неармированных стыков ($r_n = 0$, $\sigma^c_n = const$):

$$k'_t = \xi\cdot k'_{t0}, \tag{3}$$

– для стыков с абсолютно жесткими вертикальными связями ($r_n = \infty$, $\sigma^c_n = const$):

$$k'_t = k'_{t0}, \tag{4}$$

В формулах (2) – (4):

k'_{t0} – текущее значение сдвиговой жесткости, определяемое для соответствующего уровня нагружения по диаграмме

Тур Виктор Владимирович. *Д.т.н., зав. каф. технологии бетона и строительных материалов Брестского государственного технического университета.*

Шалобыта Татьяна Петровна. *Кандидат технических наук, ст. преподаватель кафедры технологии бетона и строительных материалов Брестского государственного технического университета.*

Беларусь, БГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская 267.

«$\tau_{Rd,j} - \delta_t$», r_n – нормальная (осевая) жесткость вертикальных связей (арматуры в стыковом соединении); k_n – нормальная жесткость стыкового соединения, определяемая по формуле:

$$k_n = b_1 \cdot b_2 \cdot \left(\delta_n - \beta \cdot \delta_t\right), \qquad (5)$$

где b_1, b_2 – константы, принимаемые для шероховатого стыкового соединения $b_1 = 0.008$, $b_2 = 0.88$, β_d – коэффициент дилатансии для стыкового соединения, определяемый по формуле:

$$\beta_d = 1.64 \cdot exp\left(-6.42\left|\frac{\sigma_n^c}{f_{cd}}\right|\right) \qquad (6)$$

ξ – безразмерный параметр, определяемый по формуле:

$$\xi = \mu_f \beta_d \frac{k_n}{k'_{t0}}. \qquad (7)$$

Элементы матрицы мгновенных жесткостей $[B]_{(m)}$ и $[B]_{(s)}$ допускается определять по формулам численного интегрирования, корректируя их в процессе итерационной процедуры с использованием диаграмм деформирования для материалов, принимаемых согласно СНБ 5.03.01 [2]:

$$B_{1,1(s)} = \sum_{i=1}^{n} A_{ci} \cdot E'_{c(s)} + \sum_{k=1}^{m} A_{sk} \cdot E'_{s(s)}, \qquad (8)$$

$$B_{1,2(s)} = B_{2,1(s)} = \sum_{i=1}^{n} A_{ci} \cdot E'_{c(s)} \cdot y_i + \sum_{k=1}^{m} A_{sk} \cdot E'_{s(s)} \cdot y_k, \qquad (9)$$

$$B_{2,2(s)} = \sum_{i=1}^{n} A_{ci} \cdot E'_{c(s)} \cdot y_i^2 + \sum_{k=1}^{m} A_{sk} \cdot E'_{s(s)} \cdot y_k^2, \qquad (10)$$

$$B_{1,1(m)} = \sum_{j=1}^{l} A_{cj} \cdot E'_{c(m)} + \sum_{r=1}^{t} A_{sr} \cdot E'_{s(m)}, \qquad (11)$$

$$B_{1,2(m)} = B_{2,1(m)} = \sum_{j=1}^{l} A_{cj} \cdot E'_{c(m)} \cdot y_j + \sum_{r=1}^{t} A_{sr} \cdot E'_{s(m)} \cdot y_r, \qquad (12)$$

$$B_{2,2(m)} = \sum_{j=1}^{l} A_{cj} \cdot E'_{c(m)} \cdot y_j^2 + \sum_{r=1}^{t} A_{sr} \cdot E'_{s(m)} \cdot y_r^2. \qquad (13)$$

В формулах (8) – (13):

A_{ci}, A_{cj} – площадь элементарной площадки бетонного сечения, принадлежащей соответственно сборному элементу и монолитному бетону; $E'_{c(s)}$, $E'_{c(m)}$ – текущие значения модулей упругости соответственно для сборной и монолитной частей сечения, определяемые в зависимости от уровня нагружения по диаграммам «$\sigma - \varepsilon$» для материалов; $E'_{s(s)}$, $E'_{s(m)}$ – тоже для арматуры, установленной в сборной и монолитной частях сечения; A_{sk}, A_{sr} – площади сечения арматуры, установленной в сборной и монолитной частях сечения; y_i, y_j – расстояния (со своим знаком), от плоскости контакта до центра тяжести элементарных участков бетона, в пределах, соответственно, сборной и монолитной частей сечения; y_k, y_r – тоже для арматуры, располагаемой в сборной и монолитной частях сечения.

При действии на сборно-монолитную конструкцию нагрузки, равномерно распределенной по длине пролета, из решения системы уравнений (1) параметры деформированного состояния (ε_1, ε_2, φ) и касательные напряжения $\tau_{Rd,j}$ для любого сечения x по длине пролета балки, могут быть определены по формулам:

$$\tau_{Rdj}(x) = F_1 + F_2 - \alpha_0 / \alpha_1, \qquad (14)$$

где $F_1 = N_1 \cdot cos\left(\sqrt{a_1} \cdot x\right)$, $F_2 = N_2 \cdot cos\left(\sqrt{a_1} \cdot x\right)$;

при следующих граничных условиях:

при $x = 0$: $\varepsilon_1 = \varepsilon_{1,0}$; $\varepsilon_2 = \varepsilon_{2,0}$; $\varphi = \varphi_0$; $\tau_{Rd,j} = 0$;

при $x = l$: $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varphi = 0$; $\tau_{Rd,j} = 0$,

где l – полудлина балки.

$$N_1 = \alpha_0/\alpha, \quad N_2 = N_1 \cdot tg\left(\sqrt{a_1}\,\frac{l}{2}\right),$$

где $\alpha_1 = \xi \cdot k_t \cdot (D_2 - D_3)$,

$$\alpha_0 = \xi \cdot k_t \frac{V_{Sd,x}}{B_{01}}\left(-\frac{B_{1,2(s)}}{B_{1,1(s)}} + \frac{B_{1,2(m)}}{B_{1,1(m)}}\right),$$

$$D_1 = -\frac{\tau_{Rd,j} \cdot b_j \cdot B_0}{B_{01}},$$

$$D_2 = -\frac{b_j}{B_{1,1(s)}} + \frac{\tau_{Rd,j} \cdot b_j \cdot B_0}{B_{01}}\frac{B_{1,2(s)}}{B_{1,1(s)}},$$

$$D_3 = -\frac{b_j}{B_{1,1(m)}} + \frac{\tau_{Rd,j} \cdot b_j \cdot B_0}{B_{01}}\frac{B_{1,2(m)}}{B_{1,1(m)}};$$

где $B_{01} = \left[B_{2,2(m)} + B_{2,2(s)}\right] - \dfrac{B^2_{2,1(m)}}{B_{1,1(m)}}$,

$$B_0 = \frac{B_{2,1(m)}B_{1,1(s)}B_{2,1(s)}B_{1,1(m)}}{B_{1,1(m)}B_{1,1(s)}};$$

$$\varphi(x) = \frac{D_1}{\sqrt{a_1}} \cdot \left(F_3 - F_4\right) + P_1 \cdot x + P_2, \qquad (15)$$

$$F_3 = N_1 \cdot sin\left(\sqrt{a_1} \cdot x\right), \quad F_4 = N_2 \cdot cos\left(\sqrt{a_1} \cdot x\right),$$

$$P_2 = \varphi_0 + \left(\frac{D_1 N_2}{\sqrt{a_1}}\right),$$

$$P_1 = \frac{1}{l}\left(-\frac{D_1}{\sqrt{a_1}}\left[N_1 \cdot sin\left(\sqrt{a_1} \cdot l\right) - N_2 \cdot cos\left(\sqrt{a_1} \cdot l\right)\right] - \left(\varphi_0 + \frac{D_1 N_2}{\sqrt{a_1}}\right)\right)$$

$$\varepsilon_1(x) = \frac{D_2}{\sqrt{a_1}} \cdot \left(F_3 - F_4\right) + P_3 \cdot x + P_4, \qquad (16)$$

$$P_4 = \varepsilon_{1,0} + \frac{D_2}{\sqrt{a_1}} N_2,$$

$$P_3 = \frac{1}{l}\left(-\frac{D_3}{\sqrt{a_1}}\left[N_1 \cdot sin\left(\sqrt{a_1} \cdot l\right) - N_2 \cdot cos\left(\sqrt{a_1} \cdot l\right)\right] - \varepsilon_{1,0} - \left(\varphi_0 + \frac{D_2 N_2}{\sqrt{a_1}}\right)\right)$$

$$\varepsilon_2(x) = \frac{D_3}{\sqrt{a_1}} \cdot \left(F_3 - F_4\right) + P_5 \cdot x + P_6; \qquad (17)$$

$$P_6 = \varepsilon_{2,0} + \frac{D_3}{\sqrt{a_1}} N_2,$$

$$P_5 = \frac{1}{l}\left(-\frac{D_3}{\sqrt{a_1}}\left[N_1 \cdot \sin\left(\sqrt{a_1} \cdot l\right) - N_2 \cdot \cos\left(\sqrt{a_1} \cdot l\right)\right] - \varepsilon_{2,0} - \left(\varphi_0 + \frac{D_3 N_2}{\sqrt{a_1}}\right)\right)$$

При действии произвольной системы нагрузок, дифференциальные уравнения (1) рекомендуется решать методом конечных разностей, подробно описанном в работе [6]. Разбивая длину стержня на «m» частей длиной Δx, значения неизвестных величин в точке j длины стержня представляют в виде:

$$y_{l,j+1} = y_{l,j} + \Delta x\left(\frac{dy_{l,j}}{dx}\right), \tag{18}$$

где $y_{l,j} = (\varepsilon_1,\ \varepsilon_2,\ \varphi,\ \tau_{Rd,j})$ – значения параметров деформирования составного сечения и касательные напряжения в точке j по длине стержня.

Для удовлетворения граничным условиям следует выразить значения неизвестных на одном конце стержня через неизвестные на другом, и затем решить уравнения метода начальных параметров.

В качестве критерия наступления предельного состояния контактного соединения в рассматриваемом сечении x по длине пролета балки, при расчете по деформационной модели, следует принимать условие достижения тангенциальными смещениями в контакте предельных значений $\delta_{tu} = 0.4$ мм, вертикальными смещениями – $\delta_{nu} = 0.2$ мм.

ВЫВОДЫ

1. Учет развивающихся в плоскости стыкового соединения взаимных сдвигов (нелинейное деформирование контакта) позволяет более приблизиться к физической модели работы составных конструкций и повысить точность производимых расчетов.
2. Оценка прочности контакта в составе сборно-монолитной конструкции позволяет подойти более экономично к их проектированию и учесть возможность появления новых схем разрушения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Байков В.И., Додонов М.И., Расторгуев Б.С. Общий случай расчета прочности элементов по нормальным сечениям // Бетон и железобетон. — 1987. — № 5. — С. 16—18.
2. СНБ 5.03.01–98. Конструкции бетонные и железобетонные. Нормы проектирования. Проект.— ГП «Стройтехнорм».— 1998.— 275 с.
3. Yoshikawa H., Wu Z., Tanabe T. Analytical Model for Shear Slip of Cracked Concrete// Journal of Structural Engineering. — 1989. — Vol. 115, No. 4, april.— P. 771-787.
4. Тур В.В., Шалобыта Т.П., Шалобыта Н.Н. Прочностные и деформативные параметры контактных соединений сборно-монолитных конструкций /«Вестник БПИ — Строительство и архитектура», №1, 2000 — С.6064.
5. Тур В.В., Шалобыта Т.П., Шалобыта Н.Н., К построению аналитической модели работы стыкового соединения железобетонных сборно-монолитных конструкций// Проблемы и перспективы современных строительных конструкций и технологий: Сб. тр./ Под ред. В.И. Драгана.— Брест: БПИ, 1998. — С.74-78.
6. Ржаницын А.Р., Захаров В.М. Расчет составных стержней из неупругого материала с неупругими связями сдвига// Строительная механика и расчет сооружений. — 1984. — № 1. — С. 17 —19.

УДК 624.012.35

Рак Н. А.

К ПОСТРОЕНИЮ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ НЕОДНОРОДНОСТИ СТРУКТУРЫ БЕТОНА

ВВЕДЕНИЕ

В одной из наиболее проблемных публикаций последних лет [1], посвященной вопросам развития методов расчета железобетонных конструкций, отмечалось, что поведение композитных материалов типа бетона вполне удовлетворительно может быть описано некоторыми математическими моделями. Причем, если они в достаточной степени обоснованы, то могут послужить основой для прогнозирования практически всех механических свойств бетона, необходимых при проектировании конструкций. Следует отметить, что математическое моделирование свойств бетона постоянно осуществлялось по мере накопления опытных данных. В связи с этим все известные в настоящее время зависимости, описывающие свойства бетона, являются математическими моделями той или иной формы сложности.

Большинство предложений в этой области основывается на так называемом феноменологическом подходе, когда для описания механических свойств бетона используются результаты однофакторных или многофакторных экспериментов. При этом широко используются вероятностно-статистические методы, в том числе методы математического планирования эксперимента. Получили свое развитие различные реологические модели описания линейных и нелинейных процессов длительного деформирования и разрушения бетона и т.п.

В то же время такие подходы имеют невысокую эффективность в связи с тем, что они в определенной мере оторваны от системы физических представлений о процессах, происходящих в бетоне. При этом за пределами анализа часто остаются очень важные закономерности, а выбор аналитической формы модели и оценка влияния исследуемых факторов носит формальный характер.

Теоретической основой решения задачи прогнозирования свойств бетона могут быть только обобщения, основанные на анализе поведения бетона как многокомпонентного материала. При этом важно широко привлекать методы смежных наук, а именно теории ползучести, теории упругости, механики композиционных материалов, механики разрушений, физики бетона и др.

Основополагающие результаты могут быть достигнуты только на основе разработки структурно-механических моделей бетона как неоднородного материала. В связи с этим цементные композиты следует рассматривать как двух-, трех- или n-фазную неоднородную среду, в которой условно однородная матрица и распределенные в ней включения имеют

Рак Николай Александрович. *Доцент, кандидат технических наук, докторант кафедры железобетонных и каменных конструкций Белорусской государственной политехнической академии (БГПА).*
Беларусь, г. Минск, пр. Ф.Скарины, 65. E-mail:nrak@sf.unibel.by