



УДК 624.072.3

А. Л. БАЛУШКИН, канд. техн. наук, доц. института инженеров строительства и транспорта

**ИЗГИБАЕМЫЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ С РАЗНЫМИ
ТИПАМИ КОНТАКТА АРМАТУРЫ С БЕТОНОМ**

ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет».

Россия, 150023, г. Ярославль, Московский пр-т, д. 88.

Тел.: (485) 244-36-61; (903) 638-12-55 эл. почта: albalush@mail.ru

Ключевые слова: распределенные связи сдвига, дискретный анкер, взаимный сдвиг, граничные условия, сдвигающее усилие.

В статье предложена модель расчета изгибаемых железобетонных элементов с предварительно напряженной (ПН) арматурой с учетом разных вариантов контактного взаимодействия продольного армирования и бетона. Основные результаты получены с использованием теории составных стержней, адаптированной для решения специфических задач. Отмечен полифункциональный вклад поперечного армирования для обеспечения требований предельных состояний первой и второй групп.

Введение

Весь спектр изгибаемых стержневых ЖБЭ можно рассматривать как составные стержни, состоящие из бетонной и арматурных ветвей. Объединение ветвей осуществляется при помощи абсолютно жестких поперечных связей и податливых связей сдвига. При практической реализации ЖБЭ могут создаваться с разными типами контакта между бетоном и арматурными элементами. В зависимости от типа контакта связи сдвига могут быть распределенными по длине или дискретными, установленными в фиксированных точках. Наиболее распространен дисперсный или распределенный контакт между бетоном и арматурой, имеющий термин «сцепление». В ЖБЭ, в которых арматурный элемент имеет фиксацию с бетонной ветвью в дискретных точках по длине, арматурная ветвь фиксируется в 2-х точках, как правило, по концам, но возможна фиксация и в промежуточных точках по длине. Часто при таком типе контакта арматурный элемент устанавливается с предварительным или последующим натяжением.

В практике применения ЖБК имеют место конструкции, в которых арматурный элемент имеет оба вида контакта. Некоторые типы ЖБЭ с разными типами контактов представлены на рис. 1. Более полная информация о ЖБЭ с разными типами контактов представлена в работе [1].

Материалы и методы

Для моделирования процесса деформирования ЖБЭ при любых видах контакта использовались положения теории составных стержней [2], адаптированные для решения специфических задач стержневых ЖБК [3]. Жесткость распределенного контакта характеризуется жесткостью связей сдвига $G_{link,2}(x)$, МН/см². Жесткость дискретного контакта $G_{link,2d}(x)$, МН/см, численно выражает усилие, вызывающее сдвиг в дискретном анкере $g_{s2}(x_d)=1$.

Индекс «2» присвоен арматурной ветви A_{s2} , расположенной в нижней, чаще в растянутой зоне ЖБЭ.

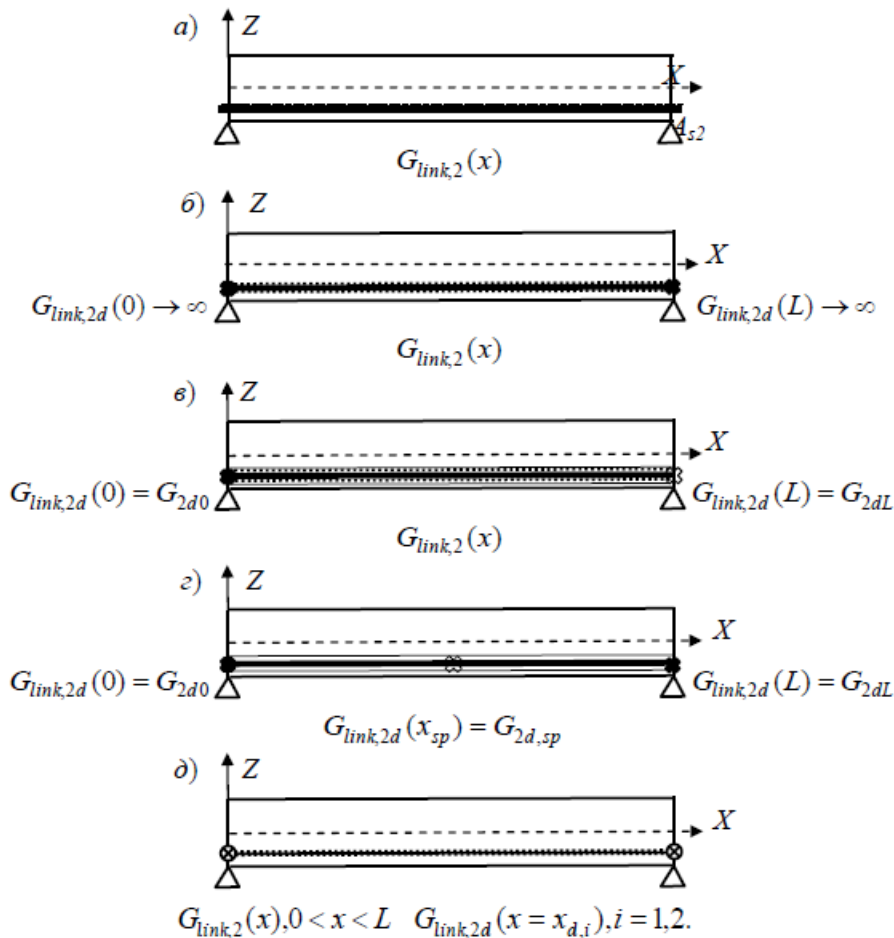


Рис. 1. Изгибаемые ЖБЭ с разными типами контакта: *a* – распределенный непрерывный контакт по всей длине; *б* – распределенный непрерывный контакт по всей длине с дополнительными дискретными анкерами по концам; *в* – ЖБЭ с постнапряжением, размещение арматурного элемента в канале или в пазах предполагается в 2-х вариантах (с последующим заполнением канала (паза) специальным раствором или без инъецирования), для обоих вариантов предполагается установка абсолютно жестких дискретных анкеров; *г* – постнапряженный элемент без инъецирования канала, элемент имеет по концам 2 активных анкера для натяжения арматуры, в средней части установлен глухой, пассивный симметричный анкер; *д* – ПН ЖБЭ, имеющий арматурный элемент со сцеплением по всей длине, усиленный по концам податливыми дискретными анкерами:

◆ – абсолютно жесткий активный анкер, используемый для фиксации и натяжения арматурного элемента;

⊗ – абсолютно жесткий пассивный (глухой анкер) предназначен только для фиксации арматурного элемента;

⊕ – податливый дискретный анкер, имеющий конечное значение жесткости против сдвига $G_{link,d2}$

В расчетных моделях дискретные анкера рассматриваются как абсолютно жесткие или податливые при восприятии сдвигающего усилия, передаваемого



продольной арматурой. Наибольшее распространение в практике применения получили дискретные анкеры кольцевого типа или в виде поперечин. Анкеры в виде поперечин реализуются в виде стержней поперечной арматуры A_{sw} , имеющие соединение с элементом продольного армирования A_{s2} . Такие анкеры имеют регулярное расположение по длине, определяемое параметром s_w , характеризующим шаг поперечной арматуры A_{sw} . Дискретные анкеры кольцевого типа устанавливаются по концам ЖБЭ, имеющего канатную или стержневую арматуру.

Для ЖБЭ, имеющего дискретные анкеры, установленные в сечениях с координатами $x = x_{d,i}, i = 1, 2, \dots, n_d$, n_d – общее число установленных дискретных анкеров в ЖБЭ, жесткость связей сдвига оценивается как:

$$G_{link,2d}^{-1}(x_{d,i}) = G_w^{-1}(x_{d,i}) + G_{con,2d}^{-1}(x_{d,i}). \quad (1)$$

Параметр $G_{con,2d}$ характеризует податливость дискретного контакта арматуры A_{s2} в зоне непосредственного взаимодействия с окружающим бетоном. Жесткость бетонной стенки при продольном сдвиге $G_w(x_{d,i})$ для элемента прямоугольного сечения, также имеющая размерность МН/см, определяется из решения задачи теории упругости. Составляющая жесткости $G_w(x_{d,i})$ для дискретного анкера в первом приближении оценивается формулой:

$$G_w^{-1}(x) = k(G_b b)^{-1}, \quad (2)$$

где G_b – модуль сдвига бетона; b – ширина сечения; k – зависит от типа поперечного сечения ЖБЭ.

Для числовой оценки параметра $G_{con,2d}$ можно использовать предложения, представленные в работах М. М. Холмянского [4–6]. Жесткость дискретных анкеров в виде поперечин, на основании данных экспериментальных исследований, зависит от диаметра поперечного стержня d_{sw} . Для значений $d_{sw} = 4 \div 14$ жесткость анкера при сдвиге $G_{con,2d} = 0,058 \div 0,88$ МН/см. Кольцевые анкеры, которые конструктивно выполняются в виде отформованных в горячем виде шаров (головок), установленных гаек, шайб, обжатых втулок (обойм) и др., обладают жесткостью при сдвиге $G_{con,2d} = 3,5 \div 10$ МН/см.

Поскольку анкеры в виде поперечин устанавливаются многократно, для приопорного участка изгибаемого ЖБЭ, где расположены 3–4 поперечных стержня, при отсутствии трещин, значения жесткости единичного кольцевого анкера и нескольких поперечин имеют близкие значения. При этом анкеры в виде поперечин обеспечивают более равномерную передачу сдвигающего усилия между арматурным элементом и бетоном.

Стержни поперечной арматуры A_{sw} , выполняющие основную функцию обеспечения прочности изгибаемого ЖБЭ при действии поперечной силы, также

являются дискретными регулярными податливыми анкерами для продольного армирования. Нижняя часть поперечных стержней расположена ниже поверхности растянутой арматурной ветви A_{s2} , поэтому окончания стержней поперечной арматуры являются организованными концентраторами деформаций в растянутом бетоне. Экспериментальные данные ряда исследователей подтверждают, что места будущих трещин проходят в непосредственной близости от мест установки поперечной арматуры. Это означает, что поперечное армирование в виде вертикальных дискретных стержней, установленных с регулярным шагом s_w можно рассматривать как систему организованных заранее концентраторов напряжений и деформаций (рис. 2). Такая система создает организованный (не стохастический) управляемый процесс образования трещин при силовом деформировании. Исследованиями, представленными в работах [3, 7–10], обнаружен факт снижения прогибов и уменьшения ширины раскрытия нормальных трещин в изгибаемых ЖБЭ с искусственно организованными концентраторами напряжений.

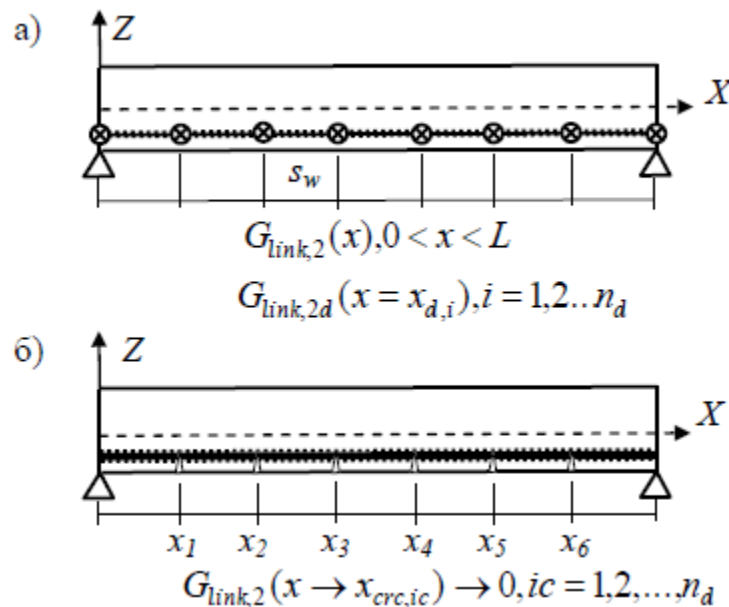


Рис. 2. Фиксация арматурного элемента системой регулярных дискретных анкеров:
а - ЖБЭ с продольной стержневой арматурой периодического профиля в сварном каркасе. Вертикальные стержни поперечной арматуры A_{sw} , установленные с регулярным шагом s_w , выполняют функцию дискретных податливых анкеров;
б - ЖБЭ с заранее организованными концентраторами деформаций. Инициаторы дискретных трещин определяют сечения, в которых отсутствует сцепление

При проектировании изгибаемых ЖБЭ следует учитывать все три отмеченных свойства поперечной арматуры. Указанные эффекты следует рассматривать как дополнительные резервы несущей способности и срока службы эксплуатируемых конструкций.



Результаты исследования

Рассматриваются изгибаемые ЖБЭ, имеющие предварительно напряженную продольную арматуру A_{s2} , в стадиях изготовления, транспортировки, монтажа и возведения объекта. Все компоненты ЖБЭ, включая контактную зону, деформируются упруго, трещин нет (рис. 3).

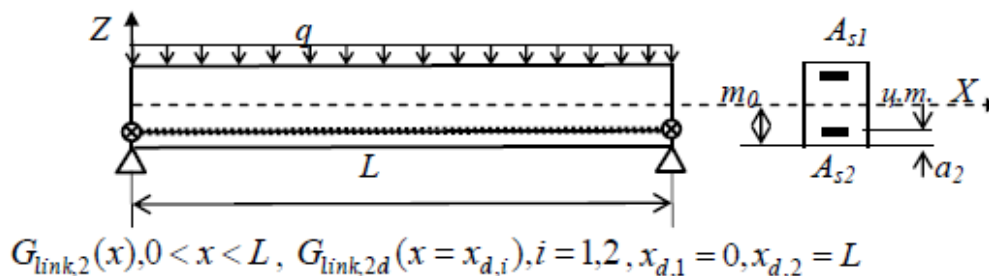


Рис. 3. Расчетная схема изгибаемого ЖБЭ, имеющего дополнительные податливые дискретные анкеры на опорах

Основная цель расчета при использовании адаптированной модели составного стержня – определение сдвигающего усилия $T_{s2}(x)$ в продольном шве для арматурной ветви A_{s2} и касательного сдвигающего напряжения (напряжения сцепления) $\tau_{s2}(x) = T'_{s2}(x)$. По значению сдвигающего усилия $T_{s2}(x)$ определяется усилие в арматурной ветви A_{s2} – $N_{s2}(x)$ и далее определяются значения всех параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) ЖБЭ. Параметр $\tau_{s2}(x)$ используется для оценки взаимных сдвигов по контакту между бетоном и арматурной ветвью $g_{s2}(x) = \tau_{s2}(x)G_{link,2}^{-1}(x)$. Объективная оценка $g_{s2}(x)$ имеет особую важность для ПН ЖБЭ на стадии передачи усилия предварительного обжатия P_{01} .

Расчет ПН ЖБЭ выполняется в два этапа. На первом этапе – для стадии обжатия (рис. 4). В момент освобождения арматуры с упоров и передачи усилия предварительного обжатия P_{01} на бетон определяется усилие $T_{s2,P}(x)$. На втором этапе расчета предполагается принятие расчетной схемы по рис. 5 с учетом действия распределенной нагрузки $q(x)$ по всему пролету и вычисление усилия $T_{s2,q}(x)$. С учетом принципа суперпозиции общее значение сдвигающего усилия в контактной зоне записывается как:

$$T_{s2}(x) = T_{s2,P}(x) + T_{s2,q}(x). \quad (3)$$

Усилие в арматурной ветви A_{s2} для стадии предварительного обжатия определяется по формуле:

$$N_{s2}(x) = N_{s20}(x) = P_{01} + T_{s2,P}(x). \quad (4)$$

Для других стадий жизненного цикла, когда учитывается действие распределенной поперечной нагрузки $q(x)$ по длине ЖБЭ, усилие в арматурной ветви A_{s2} определяется как:

$$N_{s2}(x) = N_{s20}(x) + T_{s2,q}(x) = P_{02} + T_{s2,P}(x) + T_{s2,q}(x). \quad (5)$$

Для решения задачи используется выражение для определения сдвигающего усилия для арматурной ветви $A_{s2} - T_{s2}(x)$, записанное в форме метода начальных параметров. При получении уравнений учтено, что арматурная ветвь, установленная в верхней части сечения ЖБЭ – A_{s1} имеет абсолютно жесткий контакт с бетоном $G_{link,1}(x) \rightarrow \infty$.

В стадии передачи усилия предварительного обжатия P_{01} на железобетонную ветвь параметры, характеризующие деформативность бетона, для элементов, обеспечивающих контакт арматуры и бетона, нормируются по передаточной прочности бетона R_{bp} .

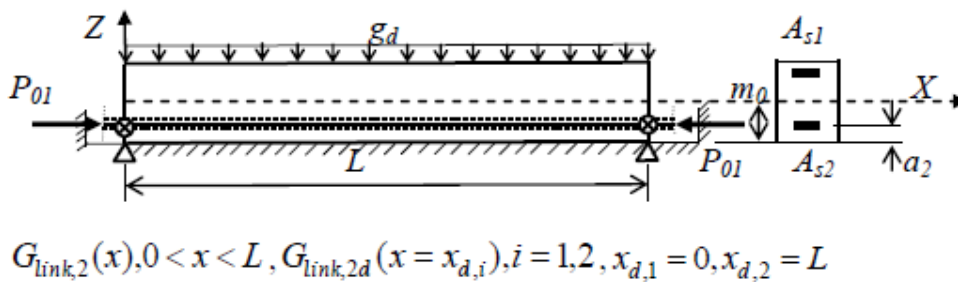


Рис. 4. Расчетная схема ПН ЖБЭ в стадии обжатия. g_d – собственный вес ЖБЭ

Для данной стадии уравнение для определения компоненты сдвигающего усилия $T_{s2,P}(x)$ имеет вид:

$$T_{s2,P}(x) = C_1 sh \lambda x + C_2 ch \lambda x + \frac{\Delta(t)}{\gamma} (ch \lambda x - 1); \quad (6)$$

$$\Delta(t) = P_{01} (A_e^{-1} + (m_0 - a_2)^2 B_e^{-1}); \quad (7)$$

$$\gamma = (E_{s2} A_{s2})^{-1} + A_e^{-1} + (m_0 - a_2)^2 B_e^{-1}; \quad \lambda = \sqrt{\gamma G_{link,2}}, \quad (8)$$

где A_e, B_e – жесткость бетонной ветви при растяжении-сжатии и при изгибе.

Произвольные постоянные C_1, C_2 определяются как:

$$C_1 = T'_{s2,P}(0) \lambda^{-1} = \tau_{s2,P}(0) \lambda^{-1} = \tau_{s20,P} \lambda^{-1}, \quad C_2 = T_{s2,P}(0) = T_{s20,P}. \quad (9)$$



Выражения для параметров $T_{s2}(x)$ и $\tau_{s2}(x)$ в стадии передачи усилия предварительного обжатия P_{01} выглядят так:

$$T_{s2,P}(x) = T'_{s2,P} \lambda^{-1} sh \lambda x + T_{s2,P}(0) ch \lambda x + \frac{\Delta(t)}{\gamma} (ch \lambda x - 1); \quad (10)$$

$$\tau_{s2,P}(x) = T'_{s2,P}(x) = T'_{s2,P}(0) ch \lambda x + \lambda T_{s2,P}(0) sh \lambda x + \frac{\Delta(t)}{\gamma} \lambda sh \lambda x. \quad (11)$$

При наличии дополнительных дискретных податливых анкеров на опорах граничные условия для определения $T_{s20,P}$ и $\tau_{s20,P}$ соответствуют краевым условиям III рода:

$$\begin{cases} (P_{01} + T_{s2,P}(0)) G_{link,2d}^{-1}(0) - T'_{s2,P}(0) G_{link,2}^{-1}(0) = 0, \\ (P_{01} + T_{s2,P}(L)) G_{link,2d}^{-1}(L) - T'_{s2,P}(L) G_{link,2}^{-1}(L) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

С учетом симметрии $T_{s2}(0) = T_{s2}(L)$ выражения для сдвигающего усилия и касательного напряжения для зоны контакта арматурного элемента с бетоном при $x = 0$, выглядят следующим образом:

$$T_{s2,P}(0) = - \left(\frac{\Delta(t)}{\gamma} + P_{01} \frac{1}{\lambda} \frac{G_{link,2}(0)}{G_{link,2d}(0)} cth \frac{\lambda L}{2} \right) C_P^{-1}; \quad (13)$$

$$\tau_{s2,P}(0) = \left(P_{01} - \frac{\Delta(t)}{\gamma} \right) \frac{G_{link,2}(0)}{G_{link,2d}(0)} C_P^{-1}; \quad (14)$$

$$C_P = 1 + \frac{1}{\lambda} \frac{G_{link,2}(0)}{G_{link,2d}(0)} cth \frac{\lambda L}{2}. \quad (15)$$

Составляющая взаимного сдвига от действия усилия $P_{01} - g_{s2,P}(x)$ контролируется на практике по концам ЖБЭ, при этом $g_{s2,P}(x) > g_{s2,q}(x)$. Для сечений с координатами $x = 0$ и $x = L$ параметр $g_{s2,P}(x)$ определяется как:

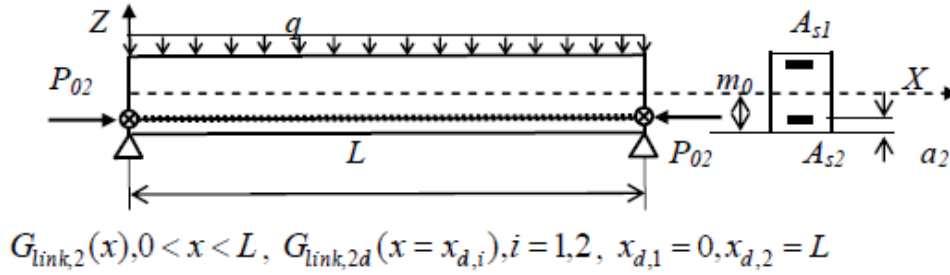
$$g_{s2,P}(0) = T_{s2,P}(0) G_{link,2d}^{-1}(0) = \tau_{s2,P}(0) G_{link,2}^{-1}(0). \quad (16)$$

Если считать внешние дискретные анкера абсолютно жесткими при продольном сдвиге $G_{link,2d}(0) = G_{link,2d}(L) \rightarrow \infty$, тогда $\tau_{s2,P}(0) = \tau_{s2,P}(L) = 0$.

Сдвигающее усилие от действия усилия обжатия принимает значение:

$$T_{s2,P}(x) = - \frac{\Delta(t)}{\gamma}. \quad (17)$$

В таком случае $\tau_{s2,P}(0 \leq x \leq L) = 0$ и $g_{s2,P}(0 \leq x \leq L) = 0$, то есть сдвигов от действия усилия P_{01} в ЖБЭ не возникает.



$$G_{link,2}(x), 0 < x < L, G_{link,2d}(x = x_{d,i}), i = 1, 2, x_{d,1} = 0, x_{d,2} = L$$

Рис. 5. Расчетная схема изгибаемого ЖБЭ, имеющего дополнительные податливые дискретные анкеры на опорах

Для других стадий жизненного цикла, при учете поперечной внешней нагрузки $q(x) - const$ (рис. 5), составляющая сдвигающего усилия $T_{s,q}(x)$ определяется так:

$$T_{s,2,q}(x) = C_1 sh \lambda x + C_2 ch \lambda x + \frac{q(m_0 - a_2)}{B_e \gamma} \left\{ \left(\frac{xL}{2} - \frac{x^2}{2} \right) - \left(\frac{Lsh \lambda x}{2\lambda} - \frac{ch \lambda x - 1}{\lambda^2} \right) \right\}. \quad (18)$$

Произвольные постоянные C_1, C_2 определяются как:

$$C_1 = T'_{s,2,q}(0) \lambda^{-1} = \tau_{s,2,q}(0) \lambda^{-1} = \tau_{s,20,q} \lambda^{-1}, C_2 = T_{s,2,q}(0) = T_{s,20,q}. \quad (19)$$

Учитывая, что $\tau_{s,2,q}(x) = T'_{s,2,q}(x)$, касательное сдвигающее напряжение в шве записывается следующим образом:

$$\tau_{s,2,q}(x) = \tau_{s,20,q} ch \lambda x + T_{s,20,q} \lambda sh \lambda x + \frac{Q_b(x)(m_0 - a_2)}{B_e \gamma} - \frac{q(m_0 - a_2)}{B_e \gamma \lambda} \left(\frac{L \lambda ch \lambda x}{2} - sh \lambda x \right); \quad (20)$$

$$Q_b(x) = M'_b(x) = q(L/2 - x), M_b(x) = q(xL/2 - x^2/2). \quad (21)$$

Для симметричной системы:

$$M_b(0) = M_b(L) = 0; T_{s,20} = T_{s,2L}. \quad (22)$$

При наличии дополнительных дискретных податливых анкеров на опорах граничные условия для определения $T_{s,20,q}$ и $\tau_{s,20,q}$ соответствуют крайним условиям III рода.

$$\begin{cases} T_{s,2,q}(0) G_{link,2d}^{-1}(0) - T'_{s,2,q}(0) G_{link,2}^{-1}(0) = 0, \\ T_{s,2,q}(L) G_{link,2d}^{-1}(L) - T'_{s,2,q}(L) G_{link,2}^{-1}(L) = 0 \end{cases} \quad (23)$$

Значения $T_{s,20,q}$ и $\tau_{s,20,q} = T'_{s,2,q}(0)$, входящие в выражения (18) и (20) с учетом (23) определяются так:

$$T_{s,2,q}(0) = C_q \left[(1 - ch \lambda L) - \frac{G_{link,2}(0)}{G_{link,2d}(0)} \frac{sh \lambda L}{\lambda} \right]^{-1}; \quad (24)$$



$$\tau_{s2,q}(0) = C_q \left[\frac{G_{link,2d}(0)}{G_{link,2}(0)} (1 - ch\lambda L) - \frac{sh\lambda L}{\lambda} \right]^{-1}; \quad (25)$$

$$C_q = -\frac{q(m_0 - a_2)}{B_e \lambda \gamma} \left[\frac{Lsh\lambda L}{2} - \frac{ch\lambda L - 1}{\lambda} \right]. \quad (26)$$

Взаимный сдвиг от действия поперечной распределенной нагрузки q в сечениях $x = 0$ и $x = L$ определяется как:

$$g_{s2,q}(0) = T_{s2,q}(0)G_{link,2d}^{-1}(0) = \tau_{s2,q}(0)G_{link,2}^{-1}(0). \quad (27)$$

При этом можно определить только значения $T_{s2,q}(0)$ или $\tau_{s20,q} = T'_{s2,q}(0)$, учитывая, что $T'_{s2,q}(0) = T_{s2,q}(0)G_{link,2d}^{-1}(0)G_{link,2}(0)$.

Значения составляющей деформаций взаимного сдвига для других сечений определяется как:

$$g_{s2,q}(x) = \tau_{s2,q}(x)G_{link,2}^{-1}(x). \quad (28)$$

Полное значение взаимного сдвига $g_{s2}(x)$ при совместном действии усилия предварительного обжатия $P_{01(02)}$ и q определяется как:

$$g_{s2}(x) = g_{s2,P}(x) + g_{s2,q}(x). \quad (29)$$

Усадка и ползучесть бетона для корректировки усилия P_{02} учитываются в виде деформаций усадки $\varepsilon_{b,shr}(\tau)$ и ползучести $\varepsilon_{b,cr}(\tau)$ с учетом принятых теоретических предпосылок.

ЖБЭ с внутренними анкерами (рис. 6) применяются в случае необходимости стыкования продольной арматуры по длине, прежде всего при использовании в качестве A_{sp} стержневой арматуры, а также арматурных канатов. Внутренний промежуточный анкер может иметь место в постнапряженных перекрытиях в местах расположения деформационных швов, отверстий, в точках изменения направления трассы моностренда.

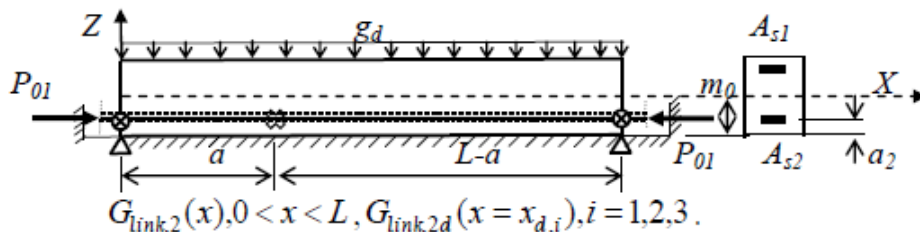


Рис. 6. ЖБЭ с внутренним промежуточным анкером

Для первой стадии работы сдвигающее усилие в арматурном элементе и сдвигающие напряжения сцепления определяются из уравнений (10), (11) с учетом граничных условий (12), дополненных условием в точке $x = a$, в месте



установки внутреннего анкера. Внутренний дискретный анкер связи сдвига с бетоном принимается двустороннего действия. В таком случае учитывается, что жесткость такого анкера будет значительной $G_{link,2d}(x=a) \rightarrow \infty$. Тогда граничные условия для стадии обжатия определяются так:

$$\begin{cases} (P_{01} + T_{s2,P}(0))G_{link,2d}^{-1}(0) - T'_{s2,P}(0)G_{link,2}^{-1}(0) = 0, \\ (P_{01} + T_{s2,P}(L))G_{link,2d}^{-1}(L) - T'_{s2,P}(L)G_{link,2}^{-1}(L) = 0, \\ T'_{s2,P}(a) = \tau_{s2}(a) = 0 \end{cases} \quad (30)$$

Для первой стадии работы ПН ЖБЭ силовые параметры контактной зоны определяются так:

$$\tau_{s2,P}(0) = -\left(\frac{\Delta(t)}{\gamma} - P_{01}\right) \left(\frac{cth\lambda a}{\lambda} + \frac{G_{link,2d}(0)}{G_{link,2}(0)}\right)^{-1}; \quad (31)$$

$$T_{s2,P}(0) = -\left(\frac{\Delta(t)}{\gamma} + P_{01} \frac{G_{link,2}(0)}{G_{link,2d}(0)} \frac{cth\lambda a}{\lambda}\right) \left(1 + \frac{G_{link,2}(0)}{G_{link,2d}(0)} \frac{cth\lambda a}{\lambda}\right)^{-1}. \quad (32)$$

При действии распределенной поперечной внешней нагрузки постоянной интенсивности $q(x) = \text{const}$ касательное напряжение сцепления в месте расположения краевого внешнего анкера определяется с использованием уравнений (18), (20) и граничных условий:

$$\begin{cases} T_{s2,q}(0)G_{link,2d}^{-1}(0) - T'_{s2,q}(0)G_{link,2}^{-1}(0) = 0, \\ T_{s2,q}(L)G_{link,2d}^{-1}(L) - T'_{s2,q}(L)G_{link,2}^{-1}(L) = 0, \\ T'_{s2,q}(a) = \tau_{s2,q}(a) = 0 \end{cases} \quad (33)$$

по формуле:

$$\tau_{s2,q}(0) = C_{qa}^{-1} \left(-\frac{Q_b(a)(m_0 - a_{s2})}{B_e \gamma} + \frac{q(m_0 - a_{s2})}{B_e \lambda \gamma} \left(\frac{L \lambda ch \lambda a}{2} - sh \lambda a \right) \right); \quad (34)$$

$$C_{qa} = ch \lambda a + \frac{G_{link,2d}(0)}{G_{link,2}(0)} \frac{sh \lambda a}{\lambda}. \quad (35)$$

Учитывая сложность выражения $\tau_{s2,q}(0)$, выражение для параметра $T_{s2,q}(0)$ имеет подобный, но еще более сложный вид, поэтому проще сдвигающее усилие $T_{s2,q}(0)$ определить, используя граничное условие:

$$T_{s2,q}(0) = \tau_{s2,q}(0)G_{link,2d}(0)G_{link,2}^{-1}(0). \quad (36)$$



Значение составляющих сдвигающего усилия $T_{s2,p}(a)$ и $T_{s2,q}(a)$, необходимых для оценки полного значения $T_{s2}(a)$ и усилия в арматурной ветви $A_{s2} - N_{s2}(a)$, определяются по формулам (10) и (18). Это, в свою очередь, дает возможность оценить НДС арматурной ветви, а также бетонной ветви.

Для определения $T_{s2,p}(L)$, $T_{s2,q}(L)$ и $\tau_{s2,p}(L)$, $\tau_{s2,q}(L)$ можно использовать формулы (34), (35), (36), заменив в выражениях λa на $\lambda(L - a)$.

Если внутренний анкер, расположенный в точке $x = x_{d,2} = a$, будет податливым с жесткостью $G_{link,2d}(x = a)$, для определения касательных сдвигающих напряжений $\tau_{s2}(0)$, $\tau_{s2}(a)$, $\tau_{s2}(L)$ требуется решать систему уравнений или определять эти параметры в процессе численного итерационного расчета, принимая в первом приближении $G_{link,2d}(x = a) \rightarrow \infty$.

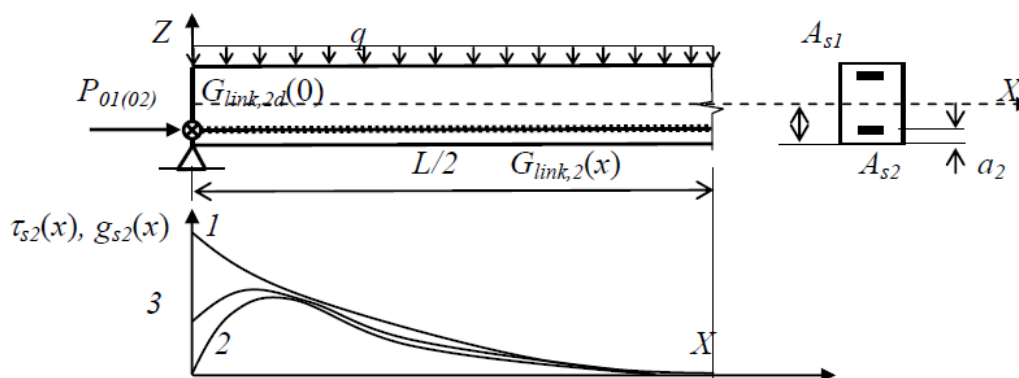


Рис. 7. Принципиальный характер зависимостей $T'_{s2}(x) = \tau_{s2}(x)$ и $g_{s2}(x)$ в зоне передачи напряжений (l_p) ПН ЖБЭ для разных условий фиксации продольной арматуры: 1 – свободный сдвиг на торце; 2 – установка дополнительного абсолютно жесткого анкера; 3 – податливый дополнительный анкер на торце

Выводы

1. Для снижения деформаций взаимных сдвигов на концевых участках ПН ЖБЭ следует устанавливать дополнительные дискретные анкеры на элементах продольного армирования.

2. В зоне передачи напряжений l_p наиболее эффективно устанавливать несколько дискретных анкеров. В качестве дискретных анкеров целесообразно использовать поперечины, конструктивно выполняемые в виде элементов поперечного армирования A_{sw} с шагом s_w .

3. Присутствие податливых дискретных анкеров приводит к трансформации эпюры взаимных сдвигов и касательных напряжений (рис. 7).

4. В изгибаемом ПН ЖБЭ развитие неупругих деформаций в распределенных связях сдвига инициируется на концевых участках (рис. 7). Для оценки параметров НДС, в стадии неупругой работы, представленные результаты



могут использоваться как индикаторы появления пластических деформаций для дальнейшего нелинейного расчета.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Балушкин, А. Л. Железобетонные конструкции с различными способами фиксации арматурных элементов / А. Л. Балушкин // Умные композиты в строительстве / Ярославский государственный технический университет. – Ярославль, 2021. – Т. 2, № 3. – С. 7–20.
2. Ржаницын, А. Р. Составные стержни и пластинки / А. Р. Ржаницын. – Москва : Стройиздат, 1986. – 316 с., ил.
3. Balushkin, A. L. Control of the deformation process of bending reinforced concrete elements with organized defects / A. L. Balushkin // AlfaBuild. – 2023, № 2 (27). – С. 2702 (1–17).
4. Холмянский, М. М. Закладные детали сборных железобетонных элементов / М. М. Холмянский. – Москва : Стройиздат, 1968. – 209 с.
5. Холмянский, М. М. Контакт арматуры с бетоном / М. М. Холмянский. – Москва : Стройиздат, 1981. – 184 с. ил.
6. Холмянский, М. М. Бетон и железобетон : деформативность и прочность / М. М. Холмянский. – Москва : Стройиздат, 1997. – 576 с. ил.
7. Митасов, В. М. Конструкции с заранее организованными трещинами / В. М. Митасов, М. А. Логунова // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – Томск, 2015. – № 1. – С. 115–121.
8. Тамразян, А. Г. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния железобетонных изгибаемых элементов с трещинами / А. Г. Тамразян, М. А. Орлова // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – Томск, 2015. – № 6. – С. 98–105.
9. Чхум, А. Влияние организованных трещин в растянутой зоне железобетонной балки при статических кратковременных нагрузках / А. Чхум, А. М. Курбонов, Ф. К. Саметов // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – Омск, 2017. – 6 (58). – С. 132–139.
10. Экспериментальные исследования трещиностойкости многопустотных плит / В. М. Митасов, Н. В. Стаценко, Ф. К. Саметов, А. М. Курбонов // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – Омск, 2019. – Том 16, № 3, сквозной номер выпуска (67). – С. 366–377.

BALUSHKIN Aleksandr Leonidovich, candidate of technical sciences, associate professor of Institute of Civil and Transport Engineers

FLEXIBLE REINFORCED CONCRETE ELEMENTS WITH DIFFERENT TYPES OF REINFORCEMENT-TO-CONCRETE CONTACT

Yaroslavl State Technical University.

88, Moskovsky Prospect, Yaroslavl, 150023, Russia.

Tel.: (485) 244-36-61; (903) 638-12-55; e-mail: albalush@mail.ru

Key words: distributed shear connections, discrete anchor, mutual shear, boundary conditions, shear force.



This article proposes a model for calculating flexural reinforced concrete elements with prestressed reinforcement, taking into account various types of contact interaction between longitudinal reinforcement and concrete. The main results are obtained using built-up bar theory, adapted to solve specific problems. The multifunctional contribution of transverse reinforcement is noted, aimed at satisfying the requirements of the first and second groups of limit states.

REFERENCES

1. Balushkin A. L. Zhelezobetonnye konstruksii s razlichnymi sposobami fiksatsii armaturnykh ehlementov [Reinforced concrete structures with various methods of fixing reinforcement elements]. Umnye kompozity v stroitelstve [Smart composites in construction] Yaroslavskii gosudarstvenny tekhnicheskii universitet. Yaroslavl, 2021, Vol. 2. № 3, P. 7–20.
2. Rzhantsyn A. R. Sostavnye sterzhni i plastinki [Built-up bars and plates]. Moscow, Stroyizdat, 1986, 316 p.
3. Balushkin A. L. Control of the deformation process of bending reinforced concrete elements with organized defects. AlfaBuild. 2023, № 2 (27), P. 2702 (1–17).
4. Kholmyanskiy M. M. Zakladnye detali sbornykh zhelezobetonnykh ehlementov [Embedded parts of precast concrete elements]. Moscow, Stroyizdat, 1968, 209 p.
5. Kholmyanskiy M. M. Kontakt armatury s betonom [Contact of reinforcement with concrete]. Moscow, Stroyizdat, 1981, 184 p., il.
6. Kholmyanskiy M. M. Beton i zhelezobeton: Deformativnost i prochnost [Concrete and reinforced concrete: Deformability and strength]. Moscow, Stroyizdat, 1997, 576 p., il.
7. Mitasov V. M., Logunova M. A. Konstruksii s zaranee organizovannymi treshchinami [Structures with pre-organized cracks]. Vestnik TGASU [Journal of Construction and Architecture] Tomskiy gosudarstvenny arkhitekturno–stroitelny universitet. Tomsk, 2015, № 1, P. 115–121.
8. Tamrazyan A. G., Orlova M. A. Ehksperimentalnye issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zhelezobetonnykh izgibaemykh ehlementov s treshchinami. [Experimental studies of the stress-strain state of reinforced concrete bending elements with cracks]. Vestnik TGASU [Journal of Construction and Architecture]. Tomskiy gosudarstvenny arkhitekturno–stroitelny universitet. Tomsk, 2015, № 6, P. 98–105.
9. Chkhum A., Kurbonov A. M., Sametov F. K. Vliyanie organizovannykh treshchin v rastyanutoy zone zhelezobetonnoy balki pri staticheskikh kratkovremennykh nagruzkakh [The influence of organized cracks in the tensile zone of a reinforced concrete beam under static short-term loads]. Vestnik SiBADI [The Russian Automobile and Highway Industry Journal] Sibirskiy gosudarstvenny avtomobilno–dorozhny universitet. Omsk, 2017, 6 (58), P. 132–139.
10. Mitasov V. M., Statsenko N. V., Sametov F. K., Kurbonov A. M. Ehksperimentalnye issledovaniya treshchinostoykosti mnogopustotnykh plit [Experimental studies of crack resistance of hollow-core slabs]. Vestnik SiBADI [The Russian Automobile and Highway Industry Journal]. Sibirskiy avtomobilno–dorozhny universitet. Omsk, 2019, Vol. 16, № 3 (67), P. 366–377.

© А. Л. Балущкин, 2026

Получено: 13.12.2025 г.