

В.Л.И. КОЛЧУНОВ^{1,2}

¹Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия

²Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ), г. Москва, Россия

МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Аннотация. В статье на основе анализа и обобщения исследований закономерностей деформирования железобетона с трещинами приведена методология расчета раскрытия трещин с использованием установленного автором эффекта железобетона - как результата воздействия арматуры на деформации берегов магистральной трещины при ее раскрытии. Показано, что при нарушении сплошности растянутой бетонной матрицы и деформировании берегов бетона в трещине, пересекаемой растянутым арматурным стержнем, изменяется профиль трещины и соответственно ее раскрытие на уровне арматурного стержня. Раскрытие единичной или магистральной трещины моделируется так называемым универсальным двухконсольным элементом (ДКЭ), который позволяет учитывать отмеченный деформационный эффект и объединить деформационные параметры, используемые в традиционной теории железобетона и механики разрушения железобетона. Податливость ДКЭ связана как с ее раскрытием, так и с перемещениями всей железобетонной конструкции и ее обобщенной жесткостью. Показано, что деформации бетона в около арматурной зоне меняют знак от растяжения к сжатию и это качественно изменяет картину относительных взаимных смещений бетона и арматуры на участках между трещинами.

Ключевые слова: эффект железобетона, гипотезы, принципы, железобетона, двухконсольный элемент, изотропная среда, механика разрушения, раскрытия - закрытия трещин, жесткость

V.L.I. KOLCHUNOV^{1,2}

¹Moscow State University of Civil Engineering (National Research University, MGSU), Moscow, Russia

²Research Institute of Building Physics, Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (NIISF), Moscow, Russia

MODEL FOR CALCULATING THE LIMIT STATE PARAMETERS OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Abstract. Based on the analysis and generalization of research on the deformation behavior of cracked reinforced concrete, the article presents a methodology for calculating crack width using the author's established reinforced concrete effect—resulting from the influence of reinforcement on the deformation of the crack edges during crack opening. It is shown that when the continuity of the tensile concrete matrix is disrupted and the crack edges deform under the action of an intersecting tensile reinforcement bar, the crack profile and, consequently, its width at the reinforcement level change. The opening of a single or main crack is modeled using a so-called universal double-cantilever element (DCE), which accounts for the described deformation effect and combines the deformation parameters used in traditional reinforced concrete theory and fracture mechanics of reinforced concrete. The compliance of the DCE is related both to crack opening and to the displacements of the entire reinforced concrete structure and its generalized stiffness. It is demonstrated that the deformations of concrete in the reinforcement-adjacent zone change from tension to compression, qualitatively altering the pattern of relative mutual displacements of concrete and reinforcement between cracks.

Keywords: reinforced concrete effect, hypotheses, principles, reinforced concrete, double-cantilever element, isotropic medium, fracture mechanics, crack opening-closing, stiffness

Введение

В настоящее время Необходимость совершенствования механики железобетона, в частности моделей деформирования железобетонных элементов с нормальными, наклонными и пространственными трещинами, продолжает оставаться одним из наиболее актуальных направлений развития теории железобетона. Проведенные за последние годы экспериментальные исследования железобетонных конструкций, испытывающих сложное сопротивление и особенно конструкций из новых материалов показывает, что используемые в действующих российских и зарубежных нормативных документах деформационные модели не всегда согласуются с результатами этих исследований. Анализ этих нормативных документов [1-4], показывает, что расчетное определение параметров предельных состояний работоспособности железобетонных конструкций, таких как ширина раскрытия трещин, по-прежнему базируется на простейших моделях, разработанных во второй половине XX-го века для балочных конструкций из бетонов относительно низкой прочности при простейших напряженных состояниях. Они не учитывают ряд вновь установленных важных физических закономерностей, возникающих при сложном напряженном состоянии в высокопрочном железобетоне с трещинами, или учитывают их по полуэмпирическим соотношениям. В особенности это относится к расчетным параметрам предельных состояний второй группы. Так, например в работах [5-7] показано, что такие важные параметры оценки железобетонных конструкций как расстояние между трещинами и ширина раскрытия трещин, вычисленные по нормам [1-3] могут отличаться от опытных значений в два и более раз.

Из анализа российских норм проектировании конструкций из высокопрочного бетона [8] можно видеть, что для расчета параметров предельных состояний второй группы в конструкциях из высокопрочного железобетона рекомендуется использовать зависимости для оценки параметров предельных состояний работоспособности модели СП 63.13330, разработанные в свое время для проектирования железобетонных конструкций из обычного железобетона. В то же время испытания конструкций из высокопрочного железобетона [9-11 и др.] показали, что их структурное поведение в процессе силового нагружения и уровневого трещинообразования количественно и качественно отличается от поведения конструкций из бетона нормальной прочности. Например, в исследованиях [12,13] было установлено, что относительный диапазон изменения деформативных характеристик на стадиях II-III-й стадиях деформирования высокопрочного железобетона в более чем в полтора-два раза меньше, чем для конструкций из бетона обычной прочности. Более того качественный характер трещин также различен, В конструкциях из высокопрочного железобетона в растянутых зонах как правило образуется не сеть нерегулярных трещин, а единичная трещина или несколько трещин преобразующихся по мере увеличения нагрузки в одну, так называемую магистральную трещину [6,12].

В развитие этих исследований в настоящей статье приводятся основные положения разработки универсального двухконсольного элемента (ДКЭ) применительно к задачам моделирования раскрытия единичных и магистральных трещин трещин и оценке жесткости сложнапряженных железобетонных конструкций из высокопрочного железобетона.

Метод

Рассматривается расчетная модель и полуаналитический метод решения задач моделирования раскрытия единичных и магистральных трещин трещин в сложнапряженных железобетонных конструкциях, основанный на анализе экспериментально установленных новых физических явлений поведения железобетонных конструкций при различных видах напряженного состояния. В частности, здесь используется деформационный эффект при трещинообразовании и раскрытии трещин в железобетоне, открытого автором [14-16 и др.] Физическая суть этого метода заключается в дополнительном деформационном воздействии реакции арматуры и бетона при нарушении сплошности бетона. Моделирование этого эффекта выполняется с использованием так называемого

двухконсольного элемента (ДКЭ), объединяющего параметры традиционной деформационной модели железобетона и параметры механики разрушения на основе функционала механики разрушения, в котором уменьшение потенциальной энергии сопровождается дополнительной работой тела при продвижении трещины.

Учитываемой физической особенностью трещинообразования в железобетоне является то, что трещина от растянутой зоны в направлении зоны сжатия, распространяется как показано на рис. 1 (а). Арматура является связью связующим звеном, которое препятствует раскрытию трещины и ее развитию. Эта связь влияет на деформации бетона вблизи трещин и вызывает нелинейные изменения в профиле раскрытия трещин. По мере удаления от арматурного стержня, на расстояние до двух-трех диаметров арматуры, ширина трещины имеет максимальное раскрытие и затем, по мере приближения к сжатой зоне ширина раскрытия постепенно уменьшается. С другой стороны, развитие трещины в направлении сжатой зоны блокируется сопротивлением растяжению бетонной матрицы. Таким образом, в бетоне проявляется так называемый деформационный эффект. При разрушении растянутой бетонной матрицы и развитии трещины перемещения ее берегов сдерживаются реакцией арматурного стержня и берега деформируются, а профиль трещины нелинейно искривляется и приобретает форму, близкую к форме эллипса.

При проявлении этого эффекта деформации бетона в околоармированной зоне на участке между трещинами меняют знак от растяжения к сжатию (рисунок 1б). Сдвигающие силы в межсредовой зоне контакта арматуры с бетоном имеют аналогичную картину деформирования на участке между трещинами (рисунок 1в). Качественная картина деформационного эффекта была может быть представлена механической моделью (г) .

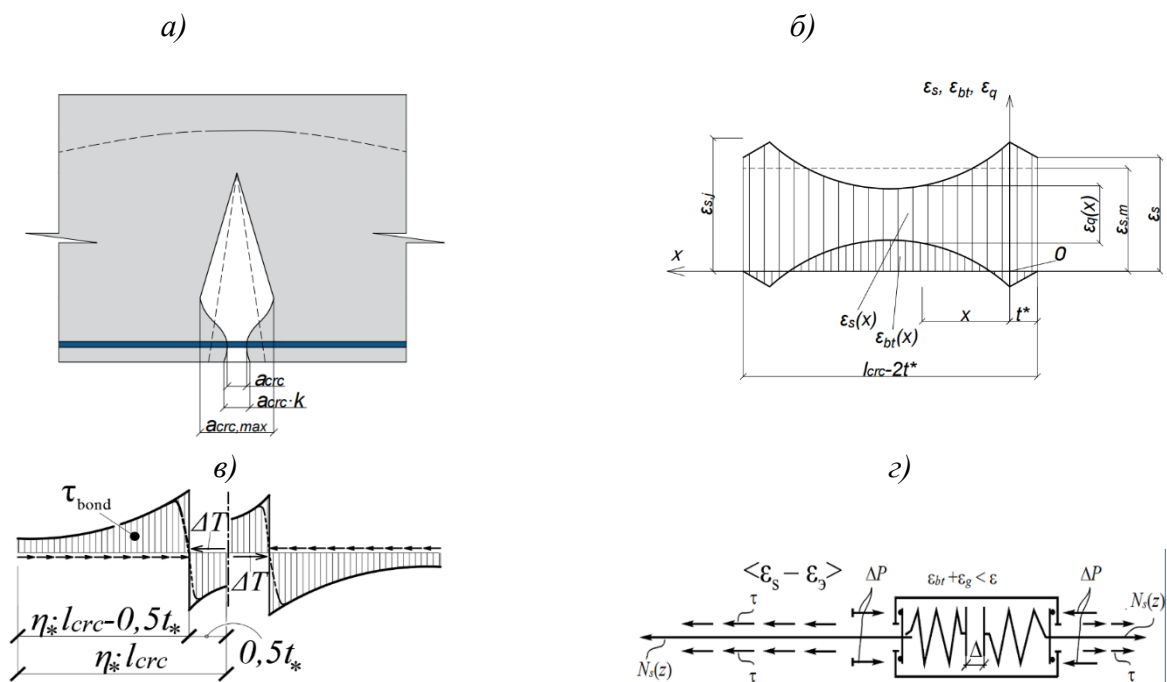


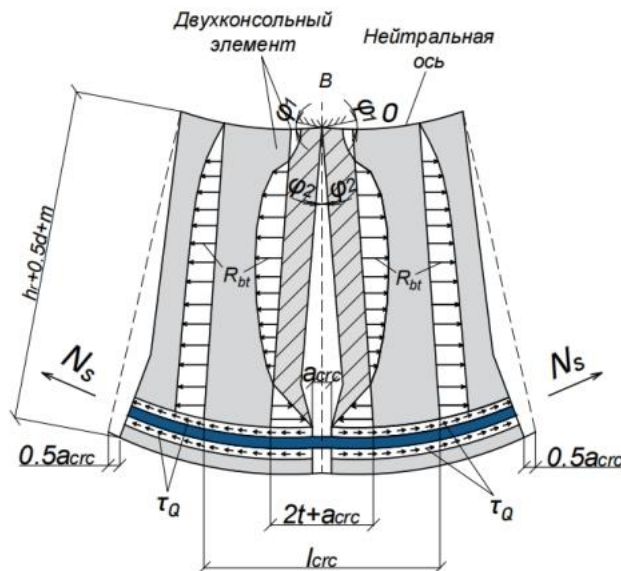
Рисунок 1 – К интерпретации деформационного эффекта железобетона: форма эллипсоидного и треугольного профиля трещин (а); относительные деформации арматуры и растянутого бетона между трещинами по оси арматурного стержня (б); сдвигающие силы в зоне контакта арматурного стержня с бетоном на участке между трещинами (в); механическая модель деформационного эффекта (г)

Рассмотрим приведенные эпюры усилий и деформаций в зоне раскрытия трещины с использованием предложенного для моделирования процесса деформирования

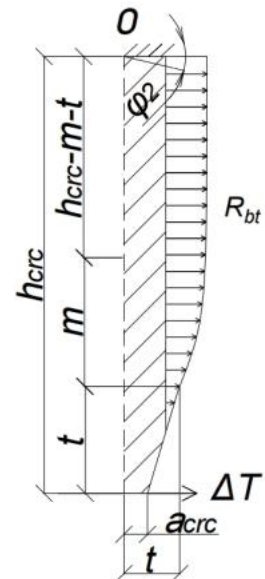
двухконсольном элементом (ДКЭ) (рисунок 2). Модель двухконсольного элемента при напряженном состоянии в изгибаемом элементе в сечении, проходящем по трещине. В зоне пересечения трещины с арматурой включает неизвестные сдвигающие усилия ΔT_i и напряжения $\sigma'_{bt,i}$. В ДКЭ учитываются нелинейный профиль трещины, с минимальным раскрытием на уровне оси растянутой арматуры и увеличением раскрытия по мере удаления от арматурного стержня. В около арматурной зоне, прилегающей к арматурному стержню, вследствие проявления деформационного эффекта, напряженное состояние в бетоне (f_{ctk}) изменяет знак с растяжения на сжатие (см. рисунки 1б и 2). Тогда раскрытие и развитие трещины может быть определено изменением энергии в двух консольном элементе (ДКЭ) используя следующее преобразование функционала механики разрушения:

$$\zeta_{bu} = \lim_{\delta A \rightarrow 0} \left(\frac{\delta W - \delta V}{\delta A} \right) = \frac{dW}{dA} - \frac{dV}{dA} = \left(\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^k f_{P,j,k,\mu}(\varepsilon_i, \sigma_i) - f_{V,\mu}(\varepsilon_i, \sigma_i) \right) \left(P^2 \frac{\partial C}{\partial A} - 2 \cdot C P \frac{\partial P}{\partial A} \right). \quad (1)$$

а)



б)



в)

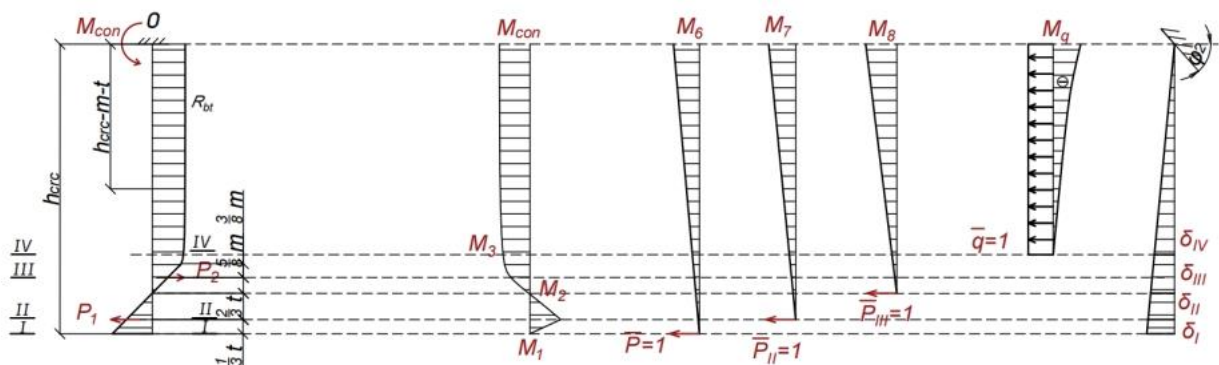


Рисунок 2 - К реализации деформационного эффекта в железобетоне в зависимости от механики разрушения и моделью двухконсольного элемента: а - схема ДКЭ в окрестности трещины, б - к расчету податливости консоли, в - расчетная схема консоли с единичными эпюрами и перемещениями от поворота заделки на угол φ_2

В общем случае длина трещины h_r , определяется из следующего условия механики разрушения:

$$\frac{d\zeta_{bu}}{dh_{crc}} = 0. \quad (2)$$

В уравнениях (1) и (2) приняты следующие обозначения: $\zeta_{b,u}$ - удельная поверхность образования трещины; δV - уменьшение потенциальной энергии тела при продвижении трещины на малое приращение δA ; δW - дополнительная работа, совершаемая над телом при продвижении трещины на малое приращение; δA - на малое приращение площади трещины на малое приращение податливости C и усилий P ($i = om1$ до n) в двухконсольном элементе ДКЭ. $f_{v,\mu}(\varepsilon_i, \sigma_i)$ - функции деформаций в диаграммы $\varepsilon_i - \sigma_i$ для бетона; $\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^k f_{p,j,k,\mu}(\varepsilon_i, \sigma_i)$ - суммирование по итерациям k для упругопластической функции от обобщенной нагрузки ($j = 1 - m$, - нагрузки).

Функция удельной поверхности образования трещины ($\zeta_{b,u}$) в общем случае определяется из энергетических соотношений и, учитывая наличие для нее четкого физического смысла и инженерной видимости функционала механики разрушения, может быть непосредственно включена в физическую строительную механику железобетона. С другой стороны, податливость ДКЭ связана с перемещениями всей железобетонной конструкции, а также с ее обобщенной жесткостью, в том числе при наличии в конструкции трещин. Тогда, следуя [14] для определения параметров неизвестных двухконсольного элемента (рисунок 2,б,в): $X_1 = \Delta T$, $X_2 = \Delta T_{crc}$, ... X_n , $P_1 = 0.5 \cdot \sigma'_{bt} \cdot b \cdot t$,

$P_2 = 2 / R_{bt} \cdot b \cdot m$ воспользуемся выражением величины ζ_{bu} , как функции податливости

$$\begin{aligned} \zeta_{cu} = \frac{dW}{dA} - \frac{dV}{dA} = & \left(\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^k f_{p,j,k,\mu}(\varepsilon_i, \sigma_i) - f_{v,\mu}(\varepsilon_i, \sigma_i) \right) \left(P^2 \frac{\partial C}{\partial A} - 2 \cdot C \cdot P \frac{\partial P}{\partial A} \right) = \left(\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^k f_{p,j,k,\mu}(\varepsilon_i, \sigma_i) - f_{v,\mu}(\varepsilon_i, \sigma_i) \right) \cdot \\ & (\Delta T^2 \cdot \frac{\partial C_I}{\partial h_{crc}} + \Delta T_{crc}^2 \cdot \frac{\partial C_{I,crc}}{\partial h_{crc}} + P_1^2 \cdot \frac{\partial C_{II}}{\partial h_{crc}} + P_2^2 \cdot \frac{\partial C_{III}}{\partial h_{crc}} + b^2 R_{bt}^2 \cdot \frac{\partial C_q}{\partial h_{crc}} + M_{con}^2 \cdot \frac{\partial C_0}{\partial h_{crc}} - \\ & - 2C_I \cdot \Delta T \frac{\partial \Delta T}{\partial h_{crc}} - 2C_{I,crc} \cdot \Delta T_{crc} \frac{\partial \Delta T_{crc}}{\partial h_{crc}} - 2C_{II} P_1 \cdot \frac{\partial P_1}{\partial h_{crc}} - 2C_{III} P_2 \cdot \frac{\partial P_2}{\partial h_{crc}} - 2C_0 M_{con} \cdot \frac{\partial M_{con}}{\partial h_{crc}}). \quad (3) \end{aligned}$$

Диаграммы зависимости «силовое воздействие – перемещение» для консоли ДКЭ имеет нелинейный характер, включая даже ниспадающую ветвь. Значение податливости консоли ДКЭ в формуле (3) определяется при использовании в качестве инструментария переходного (трансформационного) ДКЭ, являющегося связующим звеном.

Тогда, для выделенного ДКЭ, находящегося под воздействием усилий, показанных на рисунке 2б выражение (1) для величины ζ_{bu} , как функции податливости определится формулой (3).

Реализация полученной зависимости построенной на комбинации деформационной модели и энергетической механики разрушения. Перемещения Δ в сечениях I-I, II-II и III-III определяются методами строительной механики, используя эпюры, приведенные на рисунке 2в.

Перемещения Δ , связанные с поворотом заделки ДКЭ на угол φ_2 (см. рис.2 б) определяются из следующих геометрических соотношений:

$$\delta_I = \varphi_2 \cdot h_{crc}; \quad (4)$$

$$\delta_{II} = \varphi_2 \cdot \left(h_{crc} - \frac{1}{3}t \right); \quad (5)$$

$$\delta_{III} = \varphi_2 \cdot \left(h_{crc} - t - \frac{5}{8}m \right). \quad (6)$$

Здесь угол φ_2 определяется по углу поворота φ_2 , а угол φ_1 , – по кривизне железобетонного элемента.

Податливость ДКЭ, соответствующая распределенной нагрузке, может быть выражена в виде:

$$C_q = \frac{2 \cdot A_{\Delta q}}{q}, \quad (7)$$

где $q = \frac{b \cdot R_{bt}}{A_{\Delta q}}$ – площадь эпюры перемещений на участке распределенной нагрузки в формуле.

Аналогично находятся и другие параметры податливостями консоли ДКЭ (C_i), выраженные виде функции от неизвестного параметра развития трещины h_{crc} и и производной от этого параметра:

$$C_I = \frac{2 \cdot \Delta_I}{\Delta T}, C_{I,crc} = \frac{2 \cdot \Delta_{I,crc}}{\Delta T_2}, C_{II} = \frac{2 \cdot \Delta_{II}}{-P_1}, C_{III} = \frac{2 \cdot \Delta_{III}}{P_2}, C_0 = \frac{2 \cdot \varphi_2}{M_{con}}.$$

Выполняя дифференцирование выражения для касательного усилия вблизи трещины, после алгебраических преобразований получим замкнутую функциональную зависимость, связывающую касательное усилия вблизи трещины $\Delta T(h_{crc}, \zeta_t, \varepsilon_{q_{1el}}, b, t, \eta_1, \eta_2, \eta_5, \eta_7, \eta_8, \eta_{14}, \eta_{15})$ с длиной ее развития h_{crc} через новую константу удельной поверхности образования трещины бетона ζ_{bu} .

Предложенная деформационная модель (ДКЭ) расчета параметров предельных состояний железобетонных конструкций второй группы, основанная на учете деформационного эффекта достаточно универсальна, и может быть реализована при различных видах напряженного состояния в конструкциях: изгибе, растяжении, сжатии, внецентренном растяжении и внецентренном сжатии, кручении с изгибом.

Алгоритм построения ДКЭ для этих видов напряженного состояния строится аналогичным описанному при изгибе исходя из описанного физического процесса раскрытие берегов трещины: развитие трещины, увеличение ее поверхности при разрушении бетонной матрицы сдерживающая реакция арматурного стержня, пересекающего трещину и рост взаимных относительных смещений арматуры и бетона на участке между смежными трещинами.

Приведенные на рисунке 3 схемы и формы установленных экспериментальными исследованиями [11,17-19] магистральных трещин подтверждают возможность использования ДКЭ для решения задач трещиностойкости и жесткости железобетонных конструкций при таких напряженных состояниях.

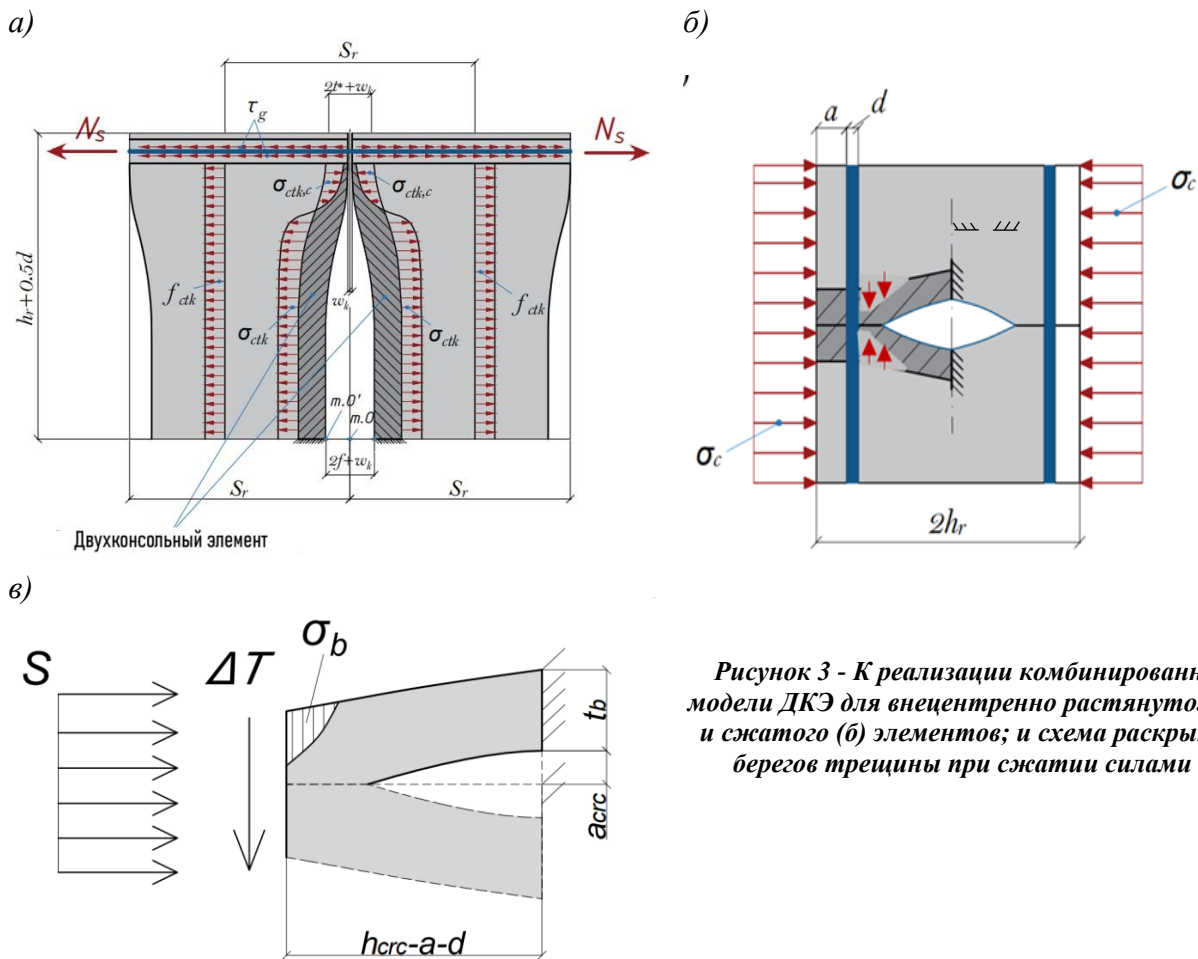


Рисунок 3 - К реализации комбинированной модели ДКЭ для внецентренно растянутого (а) и сжатого (б) элементов; и схема раскрытия берегов трещины при сжатии силами S

Результаты и обсуждение

Можно видеть что представленная комбинированная модель расчета параметров предельных состояний железобетонных конструкций второй группы учитывают ряд важных, установленных экспериментально в последние годы, параметров механики железобетона, таких как: наличие деформационного эффекта в зоне берегов трещины, наличие в конструкции из высокопрочных бетонов не только нерегулярных но и единичных трещин [8,10], сложное напряженное состояние в растянутой зоне конструкции, изменение профиля трещины по ее длине и др. Модель ДКЭ носит достаточно общий характер и объединяет параметры традиционных моделей деформирования железобетона и параметры механики разрушения железобетона, а главное – достаточно строго отражает физические процессы при силовом сопротивлении железобетона. На основе этой модели могут быть получены методики уточненного расчета ширины раскрытия трещин и жесткостей железобетонных конструкций при различных видах напряженного состояния, в том числе при запредельных состояниях для оценки живучести и сейсмостойкости зданий и сооружений при особых и аварийных воздействиях.

Выводы

1. Опираясь на результаты многовариантных экспериментальных исследований железобетонных конструкций, на основе синтеза традиционных моделей нелинейного деформирования железобетона и механики разрушения построена деформационная модель двухконсольного элемента (ДКЭ) для расчета параметров предельных состояний железобетонных конструкций второй группы позволяющая при определении этих

параметров учитывать важные особенности: наличие в конструкции не только нерегулярных но и единичных трещин, вид напряженного состояния в растянутой зоне конструкции, изменение профиля берегов трещины по ее длине, депланацию сечения в трещине и др.

2. Деформационная модель и ее механическая интерпретация обеспечивает, на энергетической, основе функциональную связь между деформациями бетона и арматуры в сечении с трещиной и со сдвигающими силами в зоне контакта арматурного стержня с бетоном на участках трещинами создавая тем самым единую методологическую основу для моделирования параметров трещиностойкости и жесткости железобетонных конструкций.

3. Анализом полученных расчетных зависимостей модели показано, что деформации бетона в около арматурной зоне меняют знак от растяжения к сжатию и это качественно изменяет всю картину относительных взаимных смещений бетона и арматуры на участках между смежными трещинами принятую в известных деформационных моделях железобетона. о средних деформациях растянутого арматурного стержня, моделях, которые традиционно используются в практике проектирования железобетонных конструкций для определения параметров предельных состояний второй группы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондаренко В.М., Колчунов Вл.И. Расчетные модели силового сопротивления железобетона. М.: Изд-во АСВ, 2004. 472 с.
2. Верюжский Ю.В., Колчунов Вл.И. Методы механики железобетона: учебное пособие. К.: Книжное изд-во НАУ, 2005. 653 с.
3. Голышев А.Б., Колчунов Вл.И. Сопротивление железобетона. К.: Основа, 2009. 432 с.
4. Голышев А.Б., Колчунов Вл.И., Яковенко И.А. Сопротивление железобетонных конструкций, зданий и сооружений, возводимых в сложных инженерно-геологических условиях: монография. К.: Талком, 2015. 371 с.
5. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 410 с.
6. Колчунов Вл.И. Некоторые проблемные задачи современной теории железобетона и их решения // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2021 году. 2022. С. 130–141.
7. Колчунов Вл.И. Метод расчетных моделей сопротивления для железобетона // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2023. Т. 19, № 3. С. 261–275.
8. Колчунов Вл.И. Обобщенные гипотезы депланации линейных и угловых деформаций в железобетонных конструкциях при изгибе с кручением // Научный журнал строительства и архитектуры. 2023. № 1 (69). С. 9–26.
9. Колчунов Вл.И., Михайлов М.М., Демьянов А.И. Статико-динамическое деформирование сжатого бетона в неопределимой железобетонной раме при изгибе с кручением // Известия вузов. Строительство. 2020. № 4. С. 5–21.
10. Колчунов Вл.И., Карпенко С.Н. Жесткость железобетонных конструкций при сложном сопротивлении // Научный журнал строительства и архитектуры. 2022. № 1 (65). С. 11–24.
11. Колчунов Вл.И., Крылов С.Б. Жесткость наклонных железобетонных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2024. № 2. С. 27–32.
12. Колчунов Вл.И., Аль-Хашими О.И., Протченко М.В. Жесткость железобетонных конструкций при изгибе с поперечной и продольной силами // Строительство и реконструкция. 2021. № 6. С. 5–19.
13. Травуш В.И., Карпенко Н.И., Колчунов Вл.И. и др. Результаты экспериментальных исследований конструкций квадратного и коробчатого сечений из высокопрочного бетона при кручении с изгибом // Строительство и реконструкция. 2018. № 6 (80). С. 32–43.
14. Demyanov A., Kolchunov V.I. The dynamic loading in longitudinal and transverse reinforcement at instant emergence of the spatial crack in reinforced concrete element under the action of a torsion with bending // Journal of Applied Engineering Science. 2017. Vol. 15, № 3. Art. 456. P. 375–380. DOI: 10.5937/jaes15-14663.
15. Fedorov V.S., Kolchunov V.I., Pokusaev A.A., Naumov N.V. Calculation models of deformation of reinforced concrete constructions with spatial cracks // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2020. № 3 (47). P. 6–26. DOI: 10.36622/VSTU.2020.47.3.001.
16. Karpenko N.I., Kolchunov V.I., Travush V.I. Calculation model of a complex stress reinforced concrete element of a boxed section during torsion with bending // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2021. № 3 (51). P. 7–26. DOI: 10.36622/VSTU.2021.51.3.001.
17. Kolchunov V. The Effect of Reinforced Concrete for Crack Resistance and Rigidity Based on Mechanics of Fracture Under Bending // Modern Problems in Construction. 2021. LNCE. Vol. 287. P. 79–97. DOI: 10.1007/978-3-031-12703-8_7.
18. Kolchunov V. Experimental Investigation of RC Frame with Sway Columns Under Corner Column Removal Scenario // Modern Problems in Construction. 2022. LNCE. Vol. 372. P. 291–313. DOI: 10.1007/978-3-031-36723-6_18.

19. Iakovenko I., Kolchunov V.I. The development of fracture mechanics hypotheses applicable to the calculation of reinforced concrete structures for the second group of limit states // *Journal of Applied Engineering Science*. 2017. Vol. 15, № 3. Art. 455. P. 366–375. DOI: 10.5937/jaes15-14662.
20. Kolchunov V.I., Demyanov A., Naumov N. Analysis of the “nagel effect” in reinforced concrete structures under torsion with bending // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 953. Art. 012052. DOI: 10.1088/1757-899X/953/1/012052.
21. Kolchunov V.I., Fedorov V.S. Conceptual Hierarchy of Models in the Theory of Resistance of Building Structures // *Industrial and Civil Engineering*. 2020. № 8. P. 16–23. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.08.16-23.
22. Kolchunov V.I., Demyanov A.I. The modeling method of discrete cracks and rigidity in reinforced concrete // *Magazine of Civil Engineering*. 2019. № 88 (4). P. 60–69.
23. Kolchunov V.I., Smirnov B., Naumov N. Physical essence of the “nagel effect” for main reinforcement in an inclined crack of reinforced concrete structures // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 896. Art. 012055. DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012055.
24. Fu Q.-L., Tan L., Long B., Kang S.-B. Numerical Investigations of Progressive Collapse Behaviour of Multi-Storey Reinforced Concrete Frames // *Buildings*. 2023. Vol. 13, № 2. Art. 533. DOI: 10.3390/buildings13020533.
25. Classen M. Shear Crack Propagation Theory (SCPT)–The mechanical solution to the riddle of shear in RC members without shear reinforcement // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 210.
26. Kaklauskas G., Sokolov A., Sakalauskas K. Strain compliance crack model for RC beams: primary versus secondary cracks // *Engineering Structures*. 2023. Vol. 281. Art. 115770.
27. Dey A., Valiukas D., Jakubovskis R. et al. Experimental and numerical investigation of bond-slip behavior of high-strength reinforced concrete at service load // *Materials*. 2022. Vol. 15, № 1. Art. 293. DOI: 10.3390/ma15010293.
28. Faron A., Rombach G.A. Simulation of crack growth in reinforced concrete beams using extended finite element method // *Engineering Failure Analysis*. 2020. Vol. 116. Art. 104698.
29. Thomas F.G. Cracking in reinforced concrete // *The Structural Engineer*. 1936. Vol. 14, № 7. P. 298–320.

REFERENCES

1. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. *Calculation Models of Strength Resistance of Reinforced Concrete*. Moscow: ASV Publishing, 2004. 472 p.
2. Veriuzhsky Yu.V., Kolchunov V.I. *Methods of Reinforced Concrete Mechanics: Textbook*. Kyiv: NAU Book Publishing, 2005. 653 p.
3. Golyshev A.B., Kolchunov V.I. *Resistance of Reinforced Concrete*. Kyiv: Osnova, 2009. 432 p.
4. Golyshev A.B., Kolchunov V.I., Yakovenko I.A. *Resistance of Reinforced Concrete Structures, Buildings, and Facilities Constructed in Complex Engineering-Geological Conditions: Monograph*. Kyiv: Talkom, 2015. 371 p.
5. Karpenko N.I. *General Models of Reinforced Concrete Mechanics*. Moscow: Stroyizdat, 1996. 410 p.
6. Kolchunov V.I. Some problematic tasks of modern reinforced concrete theory and their solutions. In: *Fundamental, Exploratory, and Applied Research by RAACS on Scientific Support for the Development of Architecture, Urban Planning, and the Construction Industry of the Russian Federation in 2021*. 2022. P. 130–141.
7. Kolchunov V.I. Method of calculation models of resistance for reinforced concrete. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2023. Vol. 19, No. 3. P. 261–275.
8. Kolchunov V.I. Generalized hypotheses of deplanation of linear and angular deformations in reinforced concrete structures under bending with torsion. *Scientific Journal of Construction and Architecture*. 2023. No. 1 (69). P. 9–26.
9. Kolchunov V.I., Mikhailov M.M., Demyanov A.I. Static-dynamic deformation of compressed concrete in a statically indeterminate reinforced concrete frame under bending with torsion. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2020. No. 4. P. 5–21.
10. Kolchunov V.I., Karpenko S.N. Stiffness of reinforced concrete structures under complex resistance. *Scientific Journal of Construction and Architecture*. 2022. No. 1 (65). P. 11–24.
11. Kolchunov V.I., Krylov S.B. Stiffness of inclined reinforced concrete structures. *Industrial and Civil Construction*. 2024. No. 2. P. 27–32.
12. Kolchunov V.I., Al-Hashimi O.I., Protchenko M.V. Stiffness of reinforced concrete structures under bending with transverse and longitudinal forces. *Construction and Reconstruction*. 2021. No. 6. P. 5–19.
13. Travush V.I., Karpenko N.I., Kolchunov V.I. et al. Results of experimental studies of square and box-section structures made of high-strength concrete under torsion with bending. *Construction and Reconstruction*. 2018. No. 6 (80). P. 32–43.
14. Demyanov A., Kolchunov V.I. The dynamic loading in longitudinal and transverse reinforcement at instant emergence of the spatial crack in reinforced concrete element under the action of a torsion with bending. *Journal of Applied Engineering Science*. 2017. Vol. 15, No. 3. Art. 456. P. 375–380. DOI: 10.5937/jaes15-14663.

15. Fedorov V.S., Kolchunov V.I., Pokusaev A.A., Naumov N.V. Calculation models of deformation of reinforced concrete constructions with spatial cracks. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2020. No. 3 (47). P. 6–26. DOI: 10.36622/VSTU.2020.47.3.001.
16. Karpenko N.I., Kolchunov V.I., Travush V.I. Calculation model of a complex stress reinforced concrete element of a boxed section during torsion with bending. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2021. No. 3 (51). P. 7–26. DOI: 10.36622/VSTU.2021.51.3.001.
17. Kolchunov V. The Effect of Reinforced Concrete for Crack Resistance and Rigidity Based on Mechanics of Fracture Under Bending. *Modern Problems in Construction*. 2021. LNCE. Vol. 287. P. 79–97. DOI: 10.1007/978-3-031-12703-8_7.
18. Kolchunov V. Experimental Investigation of RC Frame with Sway Columns Under Corner Column Removal Scenario. *Modern Problems in Construction*. 2022. LNCE. Vol. 372. P. 291–313. DOI: 10.1007/978-3-031-36723-6_18.
19. Iakovenko I., Kolchunov V.I. The development of fracture mechanics hypotheses applicable to the calculation of reinforced concrete structures for the second group of limit states. *Journal of Applied Engineering Science*. 2017. Vol. 15, No. 3. Art. 455. P. 366–375. DOI: 10.5937/jaes15-14662.
20. Kolchunov V.I., Demyanov A., Naumov N. Analysis of the “nagel effect” in reinforced concrete structures under torsion with bending. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 953. Art. 012052. DOI: 10.1088/1757-899X/953/1/012052.
21. Kolchunov V.I., Fedorov V.S. Conceptual Hierarchy of Models in the Theory of Resistance of Building Structures. *Industrial and Civil Engineering*. 2020. No. 8. P. 16–23. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.08.16-23.
22. Kolchunov V.I., Demyanov A.I. The modeling method of discrete cracks and rigidity in reinforced concrete. *Magazine of Civil Engineering*. 2019. No. 88 (4). P. 60–69.
23. Kolchunov V.I., Smirnov B., Naumov N. Physical essence of the “nagel effect” for main reinforcement in an inclined crack of reinforced concrete structures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 896. Art. 012055. DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012055.
24. Fu Q.-L., Tan L., Long B., Kang S.-B. Numerical Investigations of Progressive Collapse Behaviour of Multi-Storey Reinforced Concrete Frames. *Buildings*. 2023. Vol. 13, No. 2. Art. 533. DOI: 10.3390/buildings13020533.
25. Classen M. Shear Crack Propagation Theory (SCPT)—The mechanical solution to the riddle of shear in RC members without shear reinforcement. *Engineering Structures*. 2020. Vol. 210.
26. Kaklauskas G., Sokolov A., Sakalauskas K. Strain compliance crack model for RC beams: primary versus secondary cracks. *Engineering Structures*. 2023. Vol. 281. Art. 115770.
27. Dey A., Valiukas D., Jakubovskis R. et al. Experimental and numerical investigation of bond-slip behavior of high-strength reinforced concrete at service load. *Materials*. 2022. Vol. 15, No. 1. Art. 293. DOI: 10.3390/ma15010293.
28. Faron A., Rombach G.A. Simulation of crack growth in reinforced concrete beams using extended finite element method. *Engineering Failure Analysis*. 2020. Vol. 116. Art. 104698.
29. Thomas F.G. Cracking in reinforced concrete. *The Structural Engineer*. 1936. Vol. 14, No. 7. P. 298–320.

Информация об авторе:

Колчунов Владимир Иванович

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,

Член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инженерной графики и компьютерного моделирования.

Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН), г. Москва, Россия

Главный научный сотрудник

E-mail: vlik52@mail.ru

Information about author:

Kolchunov Vladimir Iv.

Moscow State University of Civil Engineering (NIU MGSU), Moscow, Russia,

Corresponding Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, doctor of technical sciences, professor, professor of the Department of Engineering Graphics and Computer Modeling.

Scientific Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia, chief researcher

E-mail: vlik52@mail.ru