УДК 624.012.45

РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОГО КОРОТКОГО ДВУХКОНСОЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА К СОПРОТИВЛЕНИЮ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ КРУЧЕНИИ С ИЗГИБОМ

THE DEVELOPMENT OF UNIVERSAL SHORT DUAL-CONSOLE ELEMENT, FOR RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES UNDER THE ACTION TORSION WITH BENDING

А.И. ДЕМЬЯНОВ, И.А. ЯКОВЕНКО, В.И. КОЛЧУНОВ
A.I. DEM'YANOV, I.A. YAKOVENKO, V.I. KOLCHUNOV

(Юго-Западный государственный университет, Россия,
Национальный авиационный университет, Украина)
(Southwest State University, Russia,
National Aviation University, Ukrain)
E-mail: speccompany@gmail.com; i2103@ukr.net; vlik52@mail.ru

В работе развиты гипотезы механики разрушения и разработан универсальный короткий двухконсольный элемент для железобетонных конструкций зданий и сооружений, в том числе эксплуатируемых во влажностных условиях текстильных предприятий. Предложенный двухконсольный элемент применим к оценке сопротивления железобетонных конструкций в условиях различных силовых и деформационных воздействий, в том числе при кручении с изгибом. Построены упрощенные зависимости для энергетического функционала и рассмотрены специфика и особенности построения двухконсольного элемента механики разрушения в зонах, прилегающих к пространственным трещинам с учетом эффекта нарушения сплошности. Двухконсольный элемент является связующим звеном и служит в качестве трансформационного элемента между зависимостями механики разрушения и уравнениями теории железобетона. Решение обозначенной проблемы позволяет, даже оставаясь в рамках традиционной модели сопротивления железобетона, заметно уточнить его дифференциальные параметры, измеряемые в опытах с помощью микроскопа, и объяснить многие, замеченные в экспериментах, явления, происходящие при сопротивлении железобетона силовым и деформационным воздействиям.

The hypothesis of fracture mechanics is developed in the article and a universal short dual-console element is designed for reinforced concrete structures of buildings and structures, including those operated in the moisture conditions of textile enterprises. The proposed dual-console element is applicable to the evaluation of reinforced concrete structures resistance under conditions of various force and deformation effects, including torsion with bending.Simplified dependences are constructed for the energy functional and the specifics and features of the construction of a dual-console fracture mechanics element in the zones adjacent to the spatial cracks are considered taking into account the discontinuity effect. The dual-console element is the connecting link and serves as a transformational element between the dependencies of fracture mechanics and the equations of reinforced concrete theory. The solution of the problem allows, even remaining within the framework of the traditional resistance model of reinforced concrete, considerably clarify its differential parameters measured in experiments with a microscopethat occur during the resistance of reinforced concrete to power and deformation effects.

Ключевые слова: двухконсольный элемент, железобетонные конструкции, энергетический функционал, пространственные трещины, кручение с изгибом, механика разрушения.

Keywords: dual-console element, reinforced concrete constructions, energy functional, spatial cracks, fracture mechanics.

В текстильной промышленности, базирующейся на современных технологиях, по-прежнему требуется использование большого количества воды, что значительно повышает степень агрессивности среды, в которой эксплуатируются железобетонные конструкции зданий и сооружений, обеспечивающие нормальную реализацию технологических процессов. Это приводит к значительному сокращению сроков между капитальными ремонтами и требует регулярного проведения реконструкции зданий и сооружений текстильной промышленности. При этом для эффективного выполнения конструкторских мероприятий, связанных с реконструкцией, значительное место отводится разработке расчетных моделей, позволяющих приблизить оценку их напряженно-деформированного состояния к действительному.

В последние годы все большее внимание уделяется разработке моделей деформирования железобетона с использованием и развитием инструментария и основных положений механики разрушения [1…5] и др., предоставляющих возможность глубокого изучения напряженно-деформированного состояния в окрестностях, прилегающих к трещинам. Продолжая эти исследования [1], [3…7], в статье приводятся основные положения разработки универсального короткого двухконсольного элемента, пригодного для решения задачи сопротивления железобетонных конструкций при кручении с изгибом, в том числе применительно к реконструируемым зданиям текстильной промышленности, обеспечивающих их дальнейшую безаварийную эксплуатацию.

Характерной особенностью железобетона является наличие трещин при сопротивлении его силовым и деформационным воздействиям.

Основные аспекты механики разрушения акцентируют внимание на особенностях напряженно-деформированного состояния в зонах с нарушенной сплошностью, включающих трещины. Механизм страгивания трещины (при ее развитии) заложен в зоне предразрушения, с локализованной деформацией w в этой зоне [1…7] и др. и с образованием новых удельных поверхностей трещины. Определение скорости высвобождения энергии ζ_{bu} выполняется на основании функционала механики разрушения:

$$\zeta_{bu} = \lim_{\delta A \to 0}\left(\frac{\delta W - \delta V}{\delta A}\right) = \frac{dW}{dA} - \frac{dV}{dA}, \quad (1)$$

где 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.

Остановимся более подробно на основных положениях и особенностях вырезания двухконсольного элемента (ДКЭ), включающего трещину для построения расчетного аппарата железобетона. Для сплошного тела, напряженно-деформированное состояние которого анализируется методами теории упругости и пластичности, выделяется элементарный куб, описывающий связь между напряжениями и деформациями в точке. Затем, при переходе к сечению, установленная связь интегрируется по всему сечению. В итоге задача сводится к дифференциальным уравнениям, точное решение которых, как правило, весьма сложно. В сопротивлении материалов принята гипотеза плоских деформаций для всего сечения, значительно упрощающая решение задачи. Для несплошного тела с трещиной (где нарушается сплошность тела) при установлении связи между напряжениями и перемещениями методы, разработанные в теории упругости, пластичнос-

ти и сопротивлении материалов, неприменимы. Тем не менее, использование основополагающего метода сечений применительно к материалу с трещинами приносит свои положительные результаты. Это относится и к приближенному приему определения коэффициента интенсивности напряжений, его же можно использовать и при выделении специального ДКЭ, нашедшего применение в механике разрушения.

Выделение такого ДКЭ, включающего трещину, применительно к стержневому железобетонному элементу имеет свою специфику [3], [6], [7].

Во-первых, если ДКЭ выделяется для *длинного двухконсольного элемента* (полностью включающего всю трещину) на всю длину трещины, а не для какого-то ее элементарного участка, тогда длина трещины h_{crc} в общем случае определяется из следующего условия механики разрушения:

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

При этом следует отметить, что возникающие здесь сложности являются основной причиной (наряду с необходимостью использования комплексных чисел), по которой детально разработанный инструментарий механики разрушения (позволяющий изучить особенности напряженно-деформированного состояния в окрестности трещины) еще не нашел должного применения в теории железобетона.

Рассмотрим короткий ДКЭ, длина которого известна по конструктивным соображениям (выделяется на половине длины зоны, прилегающей к трещине, расположенной между рабочими арматурными стержнями, например, хомутами или многоярусной продольной арматурой), рис. 1. При этом условие $\frac{\partial\zeta_{bu}}{\partial h_{crc}} = 0$ (из которого отыскивается длина трещины h_{crc}) заменяется условием для отыскания проекции пространственной трещины С с использованием функции Лагранжа для многих переменных (расчетных параметров разработанной деформационной модели) с использованием множителей Лагранжа λ_i. Тогда из условия экстремума функции многих переменных $F_{1,2}=f(q_{sw}, x_B, \sigma_s, x, \sigma_b, \sigma_{s,I}, \sigma_{b,1}, C_2, \ldots \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6)$ и вытекающих из него равенств нулю соответствующих частных производных:

$$\left.\begin{array}{l}
\frac{\partial f}{\partial x_1} + \lambda_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_1} + \lambda_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial x_1} + \ldots + \lambda_m \frac{\partial \varphi_m}{\partial x_1} = 0 \\
\frac{\partial f}{\partial x_2} + \lambda_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_2} + \lambda_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial x_2} + \ldots + \lambda_m \frac{\partial \varphi_m}{\partial x_2} = 0 \\
\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\
\frac{\partial f}{\partial x_n} + \lambda_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_n} + \lambda_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial x_n} + \ldots + \lambda_m \frac{\partial \varphi_m}{\partial x_n} = 0
\end{array}\right\} \quad (3)$$

отыскивается проекция пространственной трещины С.

Во-вторых, усилия в сечениях, проходящих на расстоянии t и Δb (для универсального двухконсольного элемента) от трещины, необходимо связать с искомыми параметрами напряженно-деформированного состояния железобетонного элемента.

В-третьих, не следует забывать о виртуальных перемещениях выделенных консолей ДКЭ при повороте нейтральной оси железобетонного элемента и углах поворота рабочего арматурного стержня, вызванного нагельными усилиями, то есть защемление консолей с обеих сторон ДКЭ в ряде случаев может быть не абсолютно жестким.

Таким образом, выделение ДКЭ для железобетона (являющегося трансформационным между зависимостями механики разрушения и теорией железобетона) представляет собой важную и непростую проблему. Она должна быть увязана не только с задачей определения напряженно-деформированного состояния поперечного сечения железобетонного элемента, но и с проблемой распределения сцепления между арматурой и бетоном, так как появление трещины в сплошном теле можно рассматривать как некоторое деформационное воздействие, отражающееся на особенностях сцепления арматуры и бетона в зонах, прилегающих к трещине.

С помощью ДКЭ представляется наиболее удачной (в отличие от использования функции Гурса с комплексными числами

[8]) связь его напряженно-деформированного состояния с величиной ζ_{bu} в зоне предразрушения. При этом податливость берегов трещины, через которую может быть выражена величина ζ_{bu}, определяется с использованием функционала механики разрушения.

Таким образом, ДКЭ используется в качестве связующего звена между зависимостями механики твердого деформируемого тела и механики разрушения.

Вышеизложенные соображения были использованы при разработке универсального короткого двухконсольного элемента, пригодного в том числе для решения задачи сопротивления железобетонных конструкций при кручении с изгибом (рис. 1 – универсальный ДКЭ для реализации зависимостей механики разрушения в железобетоне в зоне пространственных трещин: а – характерные эпюры напряжений в растянутом бетоне и вырезание специального ДКЭ в окрестности пространственной трещины, прилегающей к рабочей арматуре; б – особенности напряженно-деформированного состояния на кончике трещины).

Здесь параметр t в соответствии с принципом Сен-Венана и исследованиями околоарматурной зоны, выполненными с привлечением полуаналитических и численных методов, в первом приближении равен полутора диаметрам арматуры. Растягивающие напряжения в выделенных сечениях распределены по закону квадратной параболы от нейтральной оси до точки, где меняется знак этих напряжений. При этом максимальная их величина ограничивается значением R_{bt}, поэтому на значительном участке фактическое распределение растягивающих напряжений близко к прямоугольнику, независимо от закона их распределения в упругой стадии. Сжимающие напряжения в этих же сечениях на участках, прилегающих к арматуре, распределены по треугольнику. Принимается Δb в зоне, прилегающей к арматуре, равной значению защитного слоя плюс половина диаметра, и это значение удваивается (так как полоска выделяется с двух сторон арматурного стержня), рис. 1.

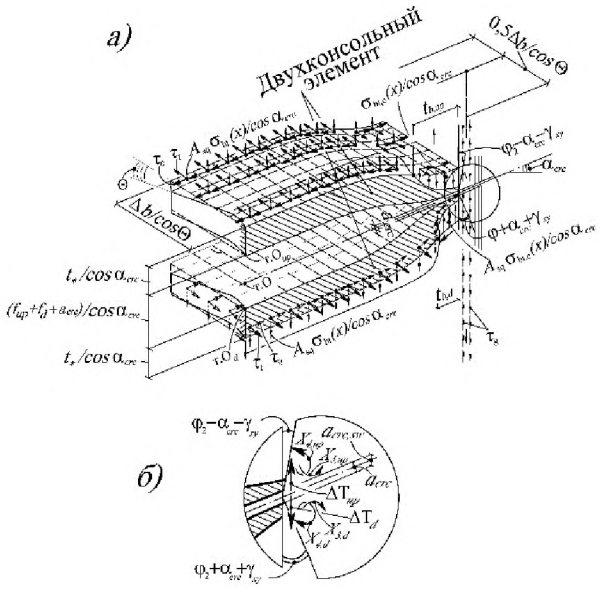

Рис. 1

При изгибе (растяжении-сжатии) выражение (4) не используется, потому что геометрия трещины по толщине b не изменяется. Пространственная же трещина закручивается, то есть ее профиль изменяется по толщине.

В итоге:

$$\Delta b = 2(a_s - 0{,}5d) \qquad (4)$$

и принимается не более 4d диаметров рабочей арматуры. Здесь a_s – расстояние от центра рабочей арматуры до нижней грани поперечного сечения; d – диаметр рабочей арматуры.

Формула (4) обусловлена принципом Сен-Венана применительно к околоарматурным зонам рабочих арматурных стержней, прилегающих к пространственной трещине, и подтверждается рядом экспериментальных исследований – Гарбой М.О. [9], Демьянова А.И. [10], Немировского Я.М., Колчунова Вл. И. [3], [4], [6], [7], Покусаева А.А. [11], Сальникова А.С. [12], Яковенко И.А. [4], [6], [7] и др.

Крутящий момент, который приходится на полоску, занимаемую ДКЭ, определяется из пропорции:

$$\frac{M_t}{b} = \frac{M_{t,ДКЭ}}{\Delta b}. \qquad (5)$$

Аналогичным образом записываются соответствующие соотношения применительно к изгибающему моменту и поперечной силе, то есть:

$$\frac{M}{b} = \frac{M_{ДКЭ}}{\Delta b}, \qquad (6)$$

$$\frac{Q}{b} = \frac{Q_{ДКЭ}}{\Delta b}. \qquad (7)$$

Для выделенного ДКЭ на толщине Δb, определяемой по формуле (4), логично упростить эту поверхность, приняв ее наклон постоянным в пределах Δb (угол Θ – угол наклона пространственной трещины в плоскости поперечного сечения). В свою очередь, угол наклона пространственной трещины в вертикальной продольной плоскости, перпендикулярной поперечному сечению, – угол α_{crc} также принимается постоянным в пределах расстояния между хомутами. До половины толщины b прямоугольной железобетонной конструкции он принимается равным $\alpha_{1,crc}$, а для второй половины – $\alpha_{2,crc}$:

$$\alpha_{2,crc} = \alpha_{1,crc} \pm 90^{\circ}. \qquad (8)$$

Знак "плюс" или "минус" принимается в зависимости от того, относительно какой стороны боковой поверхности (правой или левой) начинается отсчет угла.

Принятые упрощения дают возможность значительно упростить разрешающие уравнения, не замыкая на них в единую систему сложное уравнение поверхности пространственной трещины (на каждом шаге итерации), а используя его дискретно для выбранной полоски, толщиной Δb.

Итерационный процесс организован при использовании в качестве инструментария переходного (трансформационного) ДКЭ. Двухконсольный элемент является связующим звеном и служит в качестве трансформационного элемента между зависимостями механики разрушения и уравнениями теории железобетона.

Для определения неизвестного $X_1 = \Delta T$, $\ldots X_n$ воспользуемся выражением величины ζ_{bu} – как функции податливости. Эта функция вычисляется из определения скорости высвобождения энергии, – (1).

Податливость C элемента определяется соотношением:

$$e_0 = CP_0. \qquad (9)$$

Тогда:

$$V = \frac{2}{3}P_0^2 C, \qquad (10)$$

$$\frac{dV}{dA} = \frac{3}{4}CP\frac{\delta P}{\delta A} + \frac{2}{3}P^2\frac{\delta C}{\delta A}. \qquad (11)$$

Аналогично можно преобразовать член dW/dA:

$$\frac{dW}{dA} = P\frac{de}{dA} = PC\frac{\delta P}{\delta A} + P^2\frac{\delta C}{\delta A}. \qquad (12)$$

Подставляя выражения (11), (12) в уравнение (1), получим:

$$\zeta_{bu} = \frac{1}{3}\left(P^2\frac{\delta C}{\delta A} - CP\frac{\delta P}{\delta A}\right). \qquad (13)$$

Применительно к выделенному двухконсольному элементу, находящемуся под воздействием ряда усилий (ΔT, P_1, P_2, q, M_{con}), выражение (13) приобретает вид:

$$\zeta_{bu} = \frac{1}{3}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{P_i^2\delta C_i}{\delta A} - C_i P_i\frac{\delta P_i}{\delta A}\right). \qquad (14)$$

Для реализации полученной зависимости обратимся к рис.1. Перемещения в любых интересующих сечениях ($\Delta_1, \ldots \Delta_i$) определяются методами строительной механики.

Таким образом, в случае использования двухконсольного элемента и представилась возможной разработка универсального двухконсольного элемента для сложного сопротивления железобетонных конструкций, в том числе пригодного для кручения с изгибом.

ЛИТЕРАТУРА

1. ACI Committee 446, Fracture Mechanics (1992) Fracture mechanics of concrete structures. – Part I,

State-of-Art Report (Edited by Z.P. Bažant), Elsevier Applied Science. – London and New York: 1–140.

2. *Зайцев Ю.В.* Механика разрушения для строителей. – М.: Высшая школа, 1991.

3. *Голышев А.Б., Колчунов В.И.* Сопротивление железобетона. – К.: Основа, 2009.

4. *Колчунов В.И., Яковенко И.А.* Разработка двухконсольного элемента механики разрушения для расчета ширины раскрытия трещин железобетонных конструкций // Вестник гражданских инженеров. – 2009, №4(21). С. 160…163.

5. *Hillerborg A., Modeer M. and Petersson P.E.* Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements // Cement and Concrete Research. – 1976, 6. P.773…782.

6. *Клюева Н.В., Колчунов В.И., Яковенко И.А.* Проблемные задачи развития гипотез механики разрушения применительно к расчету железобетонных конструкций // Известия Казанского гос. архитект.-строит. ун-та. – 2014, №3(29). С. 41…45.

7. *Колчунов Вл. И., Яковенко И.А.* Об учете эффекта нарушения сплошности в железобетоне при проектировании реконструкции предприятий текстильной промышленности // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2016, №3. С.258…263.

8. Разрушение. – В 7 томах / Под ред. А. Ю. Ишлинского / Пер. с англ. – Т. 2: Математические основы теории разрушения. – М.: Изд-во Мир, 1975.

9. *Гарба М.О., Баранецкий А.О., Яковенко И.А., Колчунов В.И.* Сопротивление трещинообразованию железобетонных конструкций на изгиб с кручением // Мат. семінару Міжн. наук.-прак. фестивалю: САПР Allplan у архітектурі і будівництві (м. Київ, 22–26 квітня 2013р.). – К.: НАУ, 2013. С. 54…59.

10. *Демьянов А.И., Колчунов В.И., Сальников А.С., Михайлов М.М.* Расчетные модели статико-динамического деформирования железобетонной конструкции при кручении с изгибом в момент образования пространственной трещины // Строительство и реконструкция. – 2017, № 3 (71). С. 13…22.

11. *Сальников А.С., Клюева Н.В., Колчунов Вл.И.* Метод определения минимальной нагрузки и координат образования пространственной трещины в железобетонных конструкциях при кручении с изгибом // Промышленное и гражданское строительство. – 2016, №1. С. 52…57.

12. *Покусаев А.А., Шавыкина М.В., Колчунов В.И.* Расчет расстояния между пространственными трещинами и ширины их раскрытия в железобетонных конструкциях при кручении с изгибом (случай 1) // Строительная механика и расчет сооружений. – 2016, №2 (265). С. 20…29.

REFERENCES

1. ACI Committee 446, Fracture Mechanics (1992) Fracture mechanics of concrete structures. – Part I, State-of-Art Report (Edited by Z.P. Bažant), Elsevier Applied Science, London and New York: 1–140.

2. Zajcev Ju.V. Mehanika razrushenija dlja stroitelej. – M.: Vysshaja shkola, 1991.

3. Golyshev A.B., Kolchunov V.I. Soprotivlenie zhelezobetona. – K.: Osnova, 2009.

4. Kolchunov V.I., Jakovenko I.A. Razrabotka dvuhkonsol'nogo jelementa mehaniki razrushenija dlja rascheta shiriny raskrytija treshhin zhelezobetonnyh konstrukcij // Vestnik grazhdanskih inzhenerov. – 2009, №4(21). S. 160…163.

5. Hillerborg A., Modeer M. and Petersson P.E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements // Cement and Concrete Research. – 1976, 6. P.773…782.

6. Kljueva N.V., Kolchunov V.I., Jakovenko I.A. Problemnye zadachi razvitija gipotez mehaniki razrushenija primenitel'no k raschetu zhelezobetonnyh konstrukcij // Izvestija Kazanskogo gos. arhitekt.-stroit. un-ta. – 2014, №3(29). S. 41…45.

7. Kolchunov Vl. I., Jakovenko I.A. Ob uchete jeffekta narushenija sploshnosti v zhelezobetone pri proektirovanii rekonstrukcii predprijatij tekstil'noj promyshlennosti // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2016, №3. S.258…263.

8. Razrushenie. – V 7 tomah / Pod red. A. Ju. Ishlinskogo / Per. s angl. – T. 2: Matematicheskie osnovy teorii razrushenija. – M.: Izd-vo Mir, 1975.

9. Garba M.O., Baraneckij A.O., Jakovenko I.A., Kolchunov V.I. Soprotivlenie treshhinoobrazovaniju zhelezobetonnyh konstrukcij na izgib s krucheniem // Mat. seminaru Mizhn. nauk.-prak. festivalju: SAPR Allplan u arhitekturi i budivnictvi (m. Kiïv, 22–26 kvitnja 2013r.). – K.: NAU, 2013. S. 54…59.

10. Dem'janov A.I., Kolchunov V.I., Sal'nikov A.S., Mihajlov M.M. Raschetnye modeli statiko-dinamicheskogo deformirovanija zhelezobetonnoj konstrukcii pri kruchenii s izgibom v moment obrazovanija prostranstvennoj treshhiny // Stroitel'stvo i rekonstrukcija. – 2017, № 3 (71). S. 13…22.

11. Sal'nikov A.S., Kljueva N.V., Kolchunov Vl.I. Metod opredelenija minimal'noj nagruzki i koordinat obrazovanija prostranstvennoj treshhiny v zhelezobetonnyh konstrukcijah pri kruchenii s izgibom // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2016, №1. S.52…57.

12. Pokusaev A.A., Shavykina M.V., Kolchunov V.I. Raschet rasstojanija mezhdu prostranstvennymi treshhinami i shiriny ih raskrytija v zhelezobetonnyh konstrukcijah pri kruchenii s izgibom (sluchaj 1) // Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij. – 2016, №2 (265). S. 20…29.

Рекомендована кафедрой промышленного и гражданского строительства Юго-Западного гос. ун-та. Поступила 16.08.17.