

Режим доступа: <https://www.belta.by/economics/view/dolju-obschestvennogo-elektrotransporta-v-belarusi-k-2025-godu-hotjat-uvlichit-do-30-424784-2021/>.

4. Электромобили в Норвегии заняли более половины рынка новых машин // Энергетика Беларуси. – 2021. – № 2. – С. 5. Стратегия. – 2011. – № 2. – С. 20–29.

Молош В.В., Томашев И.Г.

ПЛОСКАЯ СТЕРЖНЕВАЯ АППРОКСИМАЦИЯ КОНТИНУАЛЬНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ЭЛЕМЕНТА В РАСЧЁТАХ СОПРОТИВЛЕНИ СРЕЗУ

Брестский государственный технический университет, кафедра прикладной механики

Введение. В настоящее время выделяют два вида образования наклонной трещины при срезе железобетонных элементов без поперечной арматуры: 1 – трещина зарождается и раскрывается у нейтральной оси в зоне максимальных касательных напряжений и развивается на всю высоту сечения, достигая сначала его наиболее растянутой грани, а затем и наиболее сжатой (наклонная «трещина первого рода»), что свойственно элементам с большим количеством продольной арматуры в растянутой зоне; 2 – наклонная трещина зарождается как продолжения нормальной трещины (наклонная «трещина второго рода»). Авторы данной работы предполагают, что образованные на начальных этапах нагружения нормальные трещины оказывают существенное влияние на образование и развитие наклонной трещины, как в первом, так и во втором из описанных выше случаев.

Предпосылки расчётной модели. Для построения расчётной стержневой модели следует рассматривать состояние железобетонного элемента близкое к предельному. Идеализированная форма конструктивного элемента в деформированном состоянии в таком случае будет иметь нормальную трещину по границе площади приложения нагрузки (в балках) или по грани колонны (в плитах) (рис. 1а) и наклоненную под углом θ трещину среза. Полное сопротивление будет включать сопротивление изгибу (сечение 1, рис. 1б) и сопротивление сдвигу (сечение 2, рис. 1б), которые будут восприниматься возникающими в продольном и поперечном направлении составляющими внутренних сил в сжатой зоне бетона и растянутой арматуре, а также, возникающей при сдвиге по наклонному сечению, равнодействующей касательных напряжений, вызванных зацеплением контактирующих поверхностей бетона в наклонной трещине.

При наличии арматуры в сжатой и растянутой зоне конечно-элементную модель, описывающую распределение внутренних сил в плоскости по высоте элемента, предложено оформлять, как приведено на рис. 1в. Верхний растянутый и нижний сжатый пояса следует принимать неразрезными, что позволит более точно учитывать влияние продольной арматуры на сопротивление в целом и в частности, как нагельное сопротивление продольной арматуры в сечении с трещиной. При этом верхний растянутый пояс следует располагать на уровне центра тяжести растянутой арматуры, а нижний сжатый — на уровне центра тяжести сжатой зоны в бетоне. Сжатые бетонные подкосы и растянутые стойки следует принимать работающими только на растяжение сжатие, т.е. ограниченными шарнирами (рис. 1в).

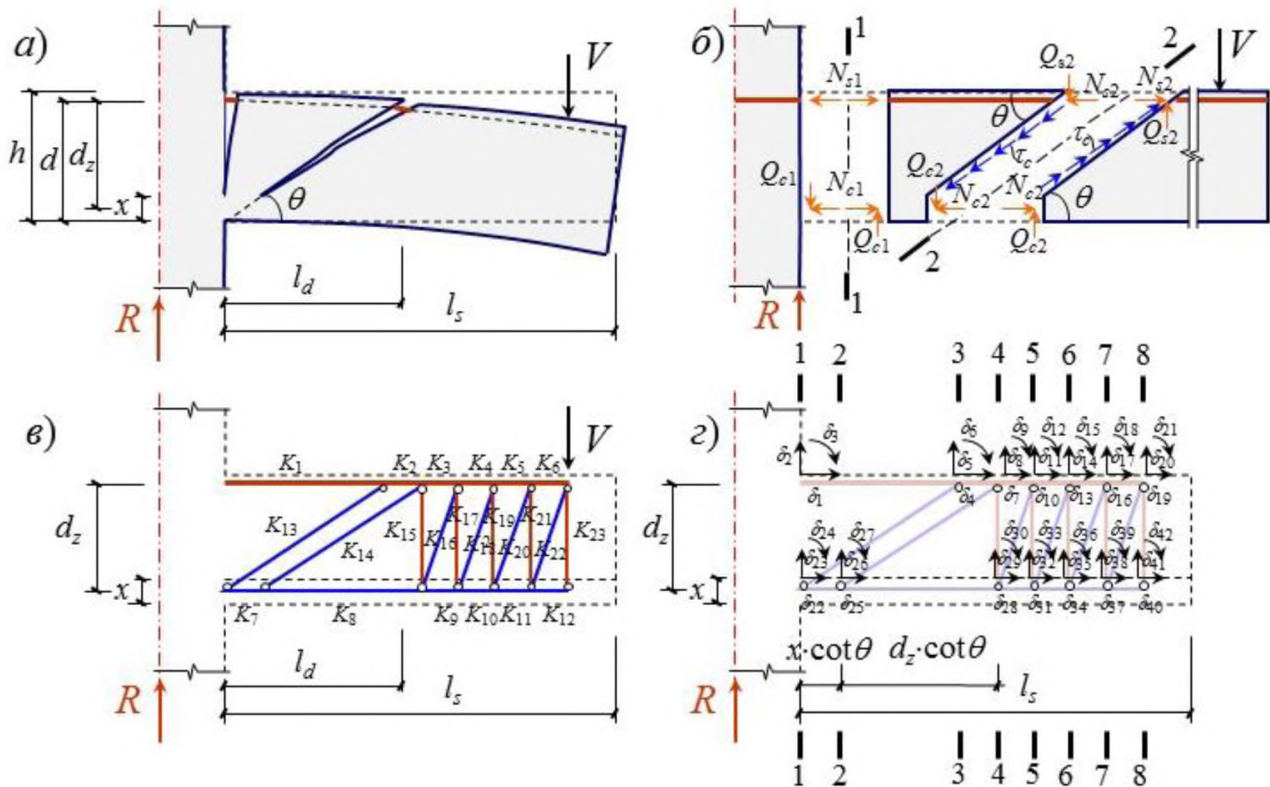


Рисунок 1 – Построение стержневой конечно-элементной модели, аппроксимирующей поведение железобетонного элемента под нагрузкой

В предложенной концептуальной модели конечные элементы K_{13} и K_{14} представляют наклонные сжатые подкосы, расположенные по обе стороны от наклонной трещины. Конечный элемент K_2 испытывает сложное сопротивление, при котором возникают деформации изгиба, сдвига и растяжения, что позволяет учесть сопротивление продольной арматуры в растянутой зоне растяжению и нагельному сопротивлению. Конечный элемент K_7 также испытывает сложное сопротивление и позволяет учесть деформации сдвига и сжатия в бетоне и арматуре в сжатой зоне при её наличии. Стойка K_{15} , работающая на растяжение, играет не менее важную роль, т.к. позволяет учитывать сопротивление отрыву защитного слоя бетона в его растянутой зоне. Таким образом, построенная стержневая модель, по мнению авторов, позволяет достаточно полно учесть все составляющие сложного сопротивления срезу железобетонного элемента.

Порядок расчёта и расчётные уравнения. На первом этапе следует выполнить расчёт нормальных сечений 1-8 (рис. 1д) на действие поперечной силы, используя уравнения общего деформационного метода расчёта нормальных сечений. Для этого необходимо разбить элемент по высоте на 10-12 полос и составить для поперечного сечения уравнения равновесия, уравнения совместности деформаций и уравнения физических свойств материалов:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \sigma_{ci} A_{ci} + \sum_{j=1}^m \sigma_{sj} A_{sj} = 0; \\ \sum_{i=1}^n \sigma_{ci} A_{ci} y_{ci} + \sum_{j=1}^m \sigma_{sj} A_{sj} y_{sj} = M_z; \end{cases} \begin{cases} \varepsilon_{ci} = \varepsilon_z + \psi \cdot y_{ci}; \\ \varepsilon_{sj} = \varepsilon_z + \psi \cdot y_{sj}; \end{cases} \begin{cases} \sigma_{ci} = f(\varepsilon_{ci}); \\ \sigma_{sj} = f(\varepsilon_{sj}), \end{cases} \quad (1)$$

где σ_{ci} , σ_{sj} – средние нормальные напряжения соответственно в i -й бетонной полосе (определяется в соответствии с [1]) и в j -м стержне арматуры; A_{ci} , A_{sj} – площадь поперечного сечения соответственно i -й бетонной полосы и j -го стержня

арматуры; y_{ci}, y_{sj} – расстояние по вертикали от наиболее сжатой грани бетона до центра тяжести соответственно i -й бетонной полосы и j -го стержня арматуры; M_z – изгибающий момент, вызванный действием внешней поперечной силы V ; ε_z – средние относительные деформации наиболее сжатой грани бетонного сечения; ψ – кривизна поперечного сечения элемента.

На втором этапе расчёта формируют данные для расчёта конечно-элементной стержневой модели: а) матрицы жёсткости конечных элементов в локальной системе координат $[K']$; б) матрицу преобразования координат $[T_\alpha]$; в) матрицы жёсткости конечных элементов в глобальной системе координат

$$[K] = [T_\alpha][K'] [T_\alpha]^T, \quad (2)$$

где $[T_\alpha]^T$ – транспонированная матрица преобразования координат; в) общую матрицу жесткости системы в глобальной системе координат; г) вектор внешних узловых нагрузок $\{P\}$.

Далее необходимо выполнить расчёт конечно-элементной стержневой модели, определив вектор перемещений $\{Z\}$, а затем и вектор усилий $\{r\}$

$$\{Z\} = [K]^{-1} \{P\}, \quad (3)$$

$$\{r\} = [K'] [T_\alpha] \{Z\}. \quad (4)$$

Касательные напряжения в i -й полосе наклонного сечения железобетонного элемента, вызванные зацепление контактирующих поверхностей в наклонной трещине, учитывают в виде внешней узловой нагрузки, определив предварительно по известной зависимости, предложенной F. J. Vecchio и M. P. Collins [2]:

$$\tau_{ci} = \frac{0,18\sqrt{f_{cm}}}{0,3 + \frac{23(d_z - y_i)\varphi}{a_g + 16}} \quad (5)$$

где f_{cm} – средняя прочность бетона на осевое сжатие; ε_c – текущая относительная деформация в бетоне при осевом сжатии; $w_i = (d_z - y_i)\varphi$ – ширина раскрытия наклонной трещины i -й полосы сечения железобетонного элемента; d_z – эффективная рабочая высота сечения железобетонного элемента; y_i – расстояние от наиболее сжатой грани до центра тяжести i -й полосы наклонного сечения железобетонного элемента; $\varphi = \theta'_{13} - \theta'_{14}$ – угол поворота наклонного сечения, определяемый как взаимный угол поворота наклонных подкосов, расположенных слева и справа от наклонной трещины (K_{13} и K_{14} на рис. 1з); θ'_{13} – угол наклона сжатого подкоса, расположенного слева от наклонной трещины (K_{13} , рис. 1з), в деформированном состоянии; θ'_{14} – угол наклона сжатого подкоса, расположенного справа от наклонной трещины (K_{14} , рис. 1з), в деформированном состоянии; a_g – максимальный диаметр зерна крупного заполнителя;

$$\theta'_{13} = \text{atan} \left(\frac{d_z - \delta_4}{d_z \cot - \delta_3} \right); \quad \theta'_{14} = \text{atan} \left(\frac{d_z + \delta_7 - \delta_{28}}{d_z \cot + \delta_6 - \delta_{25}} \right).$$

Относительные деформации в конечном элементе K_7 (в бетоне сжатой зоны), приближённо могут быть определены по формулам

$$\varepsilon_x = \frac{\delta_{25}}{x \cdot \cot \theta}; \quad \gamma = \frac{\delta_{26}}{x \cdot \cot \theta}; \quad \psi = \frac{\delta_{27}}{x \cdot \cot \theta}; \quad \begin{cases} \varepsilon_x = \varepsilon_1 \sin^2 \theta + \varepsilon_2 \cos^2 \theta; \\ \gamma = \varepsilon_1 \sin 2\theta - \varepsilon_2 \sin 2\theta. \end{cases} \quad (6)$$

где $\varepsilon_x, \gamma, \psi$ – относительные деформации соответственно при растяжении или сжатии, сдвиге и изгибе; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – главные относительные деформации в K_7 .

Для главных относительных деформаций должны выполняться условия:

$$\varepsilon_1 \leq \varepsilon_{cu}; \quad \varepsilon_2 \leq \varepsilon_{cu}, \quad (8)$$

где ε_{cu} – предельная относительная деформация в бетоне при осевом сжатии; ε_{ct} – предельная относительная деформация в бетоне при осевом растяжении.

Относительные продольные деформаций в растянутом конечном элементе K_{15} следует проверять исходя из условия:

$$\frac{\Delta l_{K15}}{l_{K15}} = \varepsilon_{K15} \leq \varepsilon_{ct}. \quad (9)$$

Относительные деформации в конечном элементе K_2 могут быть получены следующим образом:

$$\varepsilon_{K2} = \frac{\Delta u_{K2}}{l_{K2}} \leq \varepsilon_{su}; \quad \gamma_{K2} = \frac{\Delta w_{K2}}{l_{K2}} \leq \gamma_{su}; \quad \varphi_{K2} = \frac{\Delta \varphi_{K2}}{l_{K2}} \leq \varphi_{su}; \quad (10)$$

где $\Delta u_{K2} = \delta_7 - \delta_4$; $\Delta w_{K2} = \delta_8 - \delta_5$; $\Delta \varphi_{K2} = \delta_9 - \delta_6$; ε_{su} , γ_{su} , φ_{su} – предельные относительные деформации в арматуре соответственно при осевом растяжении, сдвиге и изгибе.

Итерационную процедуру расчёта следует выполнять до момента, когда перестанут выполняться приведенные выше условия. Так как конечно-элементная стержневая модель является статически неопределимой системой, при достижении в каком-либо элементе предельных деформаций рекомендуется исключить его из расчёта. Расчёт следует продолжать до разрушения n-1 связи в статически неопределимой стержневой модели, аппроксимирующей сопротивление континуального железобетонного элемента в зоне среза.

Заключение. Предложенная расчётная модель сопротивления срезу железобетонных элементов в целом позволяет учитывать совместное влияние основных составляющих внутренних сил, воспринимающих внешние воздействия: составляющую, вызванную зацеплением контактирующих поверхностей в наклонной трещине, нагельное сопротивление продольной арматуры совместно с её продольным растяжением, совместное сопротивление сдвигу и сжатию бетона в сжатой зоне конструктивного элемента. Все указанные параметры оцениваются при совместном деформировании элемента. Основной сложность следует считать определение внутренних изгибающих моментов в железобетонной плите при расчёте сопротивления срезу при продавливании, а также вопрос, касающийся точности соответствия и перераспределения внутренних усилий и деформаций в фактическом континуальном элементе и стержневой модели.

Список использованных источников:

1. Железобетонные конструкции. Основы теории, расчёта и конструирования : учеб. пособие / Н.П. Блещик, Д.Д. Жуков, Д.Н. Лазовский ; под ред. проф. Т.М. Пецольда и проф. В.В. Тура. – Брест, БГТУ, 2003 – 380 с., с ил.
2. Vecchio, F. J. The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear / F. J. Vecchio, M. P. Collins // ACI Journal Proceedings. - 1986. - Vol. 83, iss. 2. - P. 219-231.
3. Игнатюк В.И. Метод конечных элементов в расчётах стержневых систем : учеб. Пособие / В.И. Игнатюк. – Брест, БГТУ, 2007 – 172 с., ил.
4. Тур В.В. Кондратчик А.А. Расчет железобетонных конструкций при действии перерезывающих сил// Брест, БГТУ.– 2000.– 400 с.