

TURNING MOVEMENT OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS WITH INCLINED CRACKS

Dmytro Kochkarev, DS(eng)¹, **Taliat Azizov**, Professor, DSc (eng.)²,

¹ National University of Water and Environmental Engineering, Rivne,
Ukraine

² Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University, Uman, Ukraine

ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПРИ КРУЧЕНИИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С НАКЛОННЫМИ ТРЕЩИНАМИ

Кочкарев Д.В., докт. техн. наук, доц.¹, **Азизов Т.Н.**, докт. техн. наук,
проф.²

¹ Национальный университет водного хозяйства и природопользования,
г. Ровно, Украина

² Уманский государственный педагогический университет имени Павла
Тычины, г. Умань, Украина;

Abstract. The article proposes a technique for determining the mutual displacement of the edges of an inclined crack. The element with an oblique crack is replaced by an element with a step change in the section height. The equivalent section height is defined as the average between the height above the inclined crack and the total section height. The calculation method allows determining displacements in an inclined crack without using software packages using volumetric finite elements. The technique has sufficient accuracy for engineering calculations.

Аннотация. В статье предложена методика определения взаимного перемещения берегов наклонной трещины. Согласно этой методике реальный элемент с наклонной трещиной заменен элементом со ступенчатым изменением высоты и рассмотрением на участках эквивалентной жесткости.

Эквивалентная высота сечения определена как среднее значение между высотой над наклонной трещиной и полной высотой сечения. Методика расчета позволяет определить перемещения в наклонной трещине без использования программных комплексов с применением объемных конечных элементов. Будучи совершенно простой, методика имеет достаточную для инженерных расчетов точность.

Keywords: oblique crack, torsional stiffness, crack displacement, equivalent stiffness, torsion, Saint-Venant principle.

Ключевые слова: наклонная трещина, крутильная жесткость, перемещение в трещине, эквивалентная жесткость, кручение, принцип Сен-Венана.

Анализ исследований и постановка задачи.

При действии локальных нагрузок на перекрытия перераспределение усилий между отдельными его элементами зависит от соотношения их изгибных и крутильных жесткостей [3, 5, 6, 8]. В железобетонных элементах на изгибные и крутильные жесткости оказывают существенное влияние различного рода трещины. Вопросам изменения изгибных жесткостей посвящено достаточно большое количество работ [1, 12]. Вопросам определения перемещений при кручении железобетонных элементов посвящено значительно меньше работ [9-11]. В этих и других работах предполагается наличие пространственных спиральных трещин. Однако такие методики не приемлемы для расчета перемещений при кручении элементов с нормальными и наклонными трещинами, которые образуются от изгибных напряжений. В тоже время существует большой класс конструкций, подверженных воздействию и изгибающих, и крутящих моментов, в элементах которых образуются только нормальные и наклонные трещины. Это ребра ребристых сборных и монолитных перекрытий, ригели и др. [3]. Задаче определения крутильных жесткостей железобетонных элементов с нормальными трещинами посвящены работы [1, 2, 14]. В этих работах показано, что задачу определения крутильной жесткости следует

разделить на три этапа: на первом этапе продольная арматура условно рассекается и определяется взаимное смещение берегов нормальной трещины; на втором этапе определяются нагельные силы в продольной арматуре; третий этап – определение крутильной жесткости элемента с известными нагельными силами. Основной и наиболее сложной задачей является первый этап. Это связано с фактом, что использование формул теории упругости для определения перемещений в таком случае не возможно в связи с тем, что крутящий момент передается через часть сечения элемента.

В элементах многих перекрестно-балочных систем кроме нормальных образуются еще и наклонные трещины. Работы по определению крутильных жесткостей железобетонных балок с наклонными трещинами отсутствуют.

В связи с вышесказанным **целью настоящей статьи** является разработка методики расчета перемещений при кручении элемента с наклонной трещиной.

Изложение основного материала.

Как было сказано выше основной и наиболее сложной в общей задаче определения жесткости железобетонного элемента с нормальной или наклонной трещиной является определение взаимного смещения берегов трещины с уже условно рассеченной продольной арматурой. Рассмотрим элемент с наклонной трещиной, правый конец которого заделан, а к левому торцу приложен крутящий момент (рис. 1). Основной задачей при этом является определение взаимного смещения точек 4 и 5 в трещине при действии крутящего момента M_t .

Крутящий момент от блока А к блоку В передается через часть сечения высотой x_{crc} . Именно в этом состоит основная сложность определения перемещений в элементе, подверженном кручению. Методы теории упругости по определению перемещений в закручиваемом элементе предполагают, что крутящий момент передается касательными силами, распределенными по всему торцевому сечению [4]. В случае же нормальной трещины [1, 2] или наклонной трещины (см. рис. 1) этот момент передается

касательными силами, распределенными только на части торцевого сечения блока В.

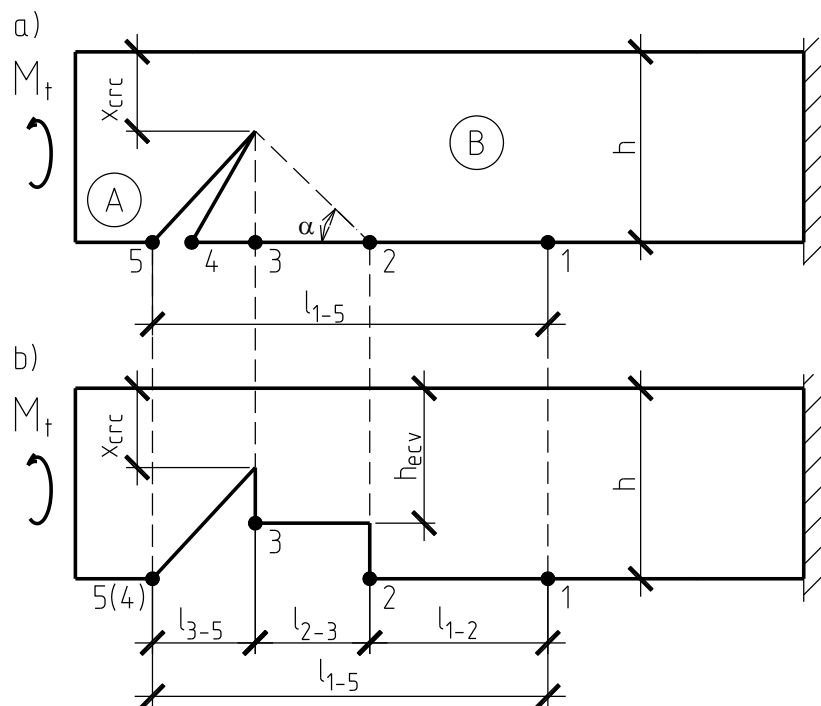


Рис. 1. Схема элемента с наклонной трещиной (а) и его представление в виде ступенчатого (б)

Угол закручивания на участке 3-5 может быть без труда определен известными методами сопротивления материалов [13] как угол закручивания элемента с переменной высотой сечения. Определение угла закручивания на участке 1-3 в случае наклонной трещины совершенно не отличается от определения угла закручивания в случае нормальной трещины. В связи с вышесказанным, следуя [2], где было показано, что в случае нормальной трещины элемент справа от трещины можно рассчитывать как условный элемент с сечением, высота которого изменяется по некоторой кривой, представим, что в нашем случае высота элемента изменяется по закону прямой линии от малой величины x_{cr} до полной высоты h . Эта линия на рис. 1 показана штриховой с углом наклона к горизонтали α . Характерные участки на рис. 1 обозначены цифрами 1...5.

На участке длиной l_{3-5} элемент имеет реальный уклон нижней грани. На участке длиной l_{2-3} элемент имеет условный наклон от высоты x_{cr} до высоты

h.

Искомый угол поворота между точками 4 и 5 будет определен из выражения:

$$\varphi_{4-5} = \varphi_{1-5} - \varphi_{1-4} \quad (1)$$

В свою очередь угол поворота φ_{1-4} будет равен сумме углов поворота:

$$\varphi_{1-4} = \varphi_{1-2} + (\varphi_{2-3} \approx \varphi_{2-4}) \quad (2)$$

Приблизительное равенство в скобках выражения (2) очевидно из рис. 1, а. Оно проверено также расчетами в программе Лира с использованием объемных конечных элементов. Действительно точки 3 и 4 являются точками не загруженного конца элемента, закручиваемого касательными силами, приложенными к верхней части его сечения высотой x_{crc} .

На наклонном участке 3-5 угол поворота будет определен с помощью известного подхода сопротивления материалов [13] как для элемента с переменной высотой сечения. Назовем этот угол φ_{3-5} и будем считать его известным. Угол поворота между точками 1 и 2 φ_{1-2} также легко определяется по известной формуле сопротивления материалов [13]:

$$\varphi_{1-2} = \frac{M_t l_{1-2}}{GJ_{tot}} \quad (3)$$

где GJ_{tot} – крутильная жесткость полного сечения (элемента с полной высотой h).

Точка 1 на рис. 1 выбрана произвольно.

Для определения угла поворота на участке длиной l_{2-3} предположим, что этот участок можно заменить участком условно постоянного сечения с высотой $h_{ekv} = (x_{crc} + h)/2$. Тогда схема элемента с наклонной трещиной по рис. 1, а будет заменена схемой элемента со ступенчатым изменением жесткости, показанной на рис. 1, б. Тогда угол поворота на участке длиной l_{2-3} также будет определен из известного выражения сопротивления материалов:

$$\varphi_{2-3} = \frac{M_t l_{2-3}}{GJ_{ekv}} \quad (4)$$

где GJ_{ekv} эквивалентная жесткость элемента условно постоянного

сечения высотой h_{ekv} .

Длина $l_{3.5}$ – это по сути проекция наклонной трещины на продольную ось элемента, которая определяется по известным методикам [7, 12].

Длина $l_{2.3}$ легко определяется из геометрических построений при известной величине x_{crc} и угле наклона α .

Расчеты по приведенной методике показывают, что угол α наклона линии изменения расчетной высоты сечения к горизонтали следует принимать равным 45 градусов. Уточнение угла наклона α или принятие линии не в виде прямой, а в виде некоторой кривой является предметом дальнейших исследований. Здесь отметим только факт, что длина участка $l_{2.3}$ будет в пределах Сен-Венановской длины. Действительно, согласно принципу Сен-Венана равномерное распределение касательных напряжений (передающихся на рис. 1 слева направо) будет на расстоянии от места приложения касательных сил (в нашем случае на участке высотой x_{crc} в точке 3), равном большему размеру поперечного сечения [2].

Для проверки методики расчета в программе Лира была смоделирована балка прямоугольного сечения с наклонной трещиной. Ширина сечения балки 100 мм, ее высота 200 мм. Остальные размеры показаны на рис. 2, а. Кроме того эта балка была рассчитана как стержень с переменным сечением (рис, 2, б) по предложенной выше методике. Модуль деформаций в обоих случаях принят $E=25000$ МПа.

Сравнивался угол поворота в уровне точки a относительно заделки (точка O на рисунке 2). Этот угол в модели из объемных конечных элементов вычислялся по формуле:

$$\varphi_{O-a} = \frac{x_b + x_a}{h}, \quad (5)$$

где x_b , x_a – перемещения по горизонтали соответственно точки a и b . Угол же поворота стержневой схемы определялся по известной формуле сопротивления материалов. Разница углов поворота для стержневой схемы и схемы из объемных конечных элементов составила 2,4%, что говорит о

достаточно высокой точности расчета по предложенной инженерной методике.

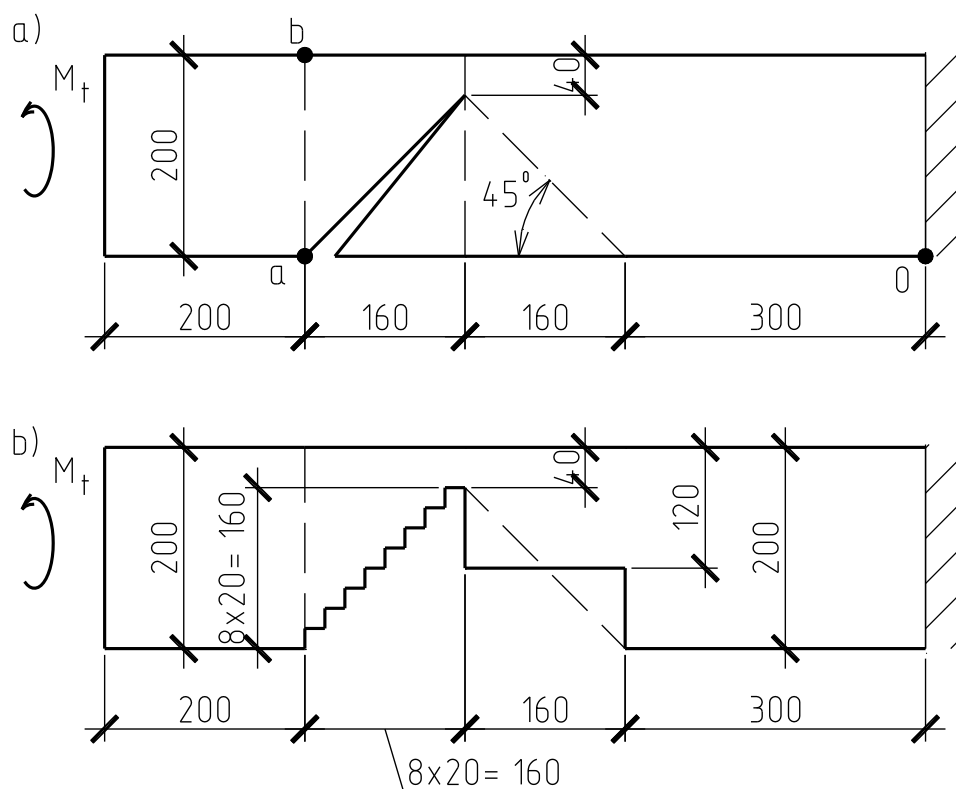


Рис. 2. Схема для сравнения результатов. а) – элемент с наклонной трещиной, смоделированный в ПК Лира объемными конечными элементами; б) – тот же элемент, представленный стержнями со ступенчатым изменением высоты сечения

Выводы и перспективы исследований.

Предложена методика определения взаимного перемещения берегов наклонной трещины. Предложено заменить реальный элемент с наклонной трещиной элементом со ступенчатым изменением высоты и рассмотрением на участках эквивалентной жесткости. Линия изменения условной высоты участка от вершины наклонной трещины наклонена под некоторым углом к горизонтали, который принят равным 45° . Методика расчета позволяет определить перемещения в трещине без использования громоздких вычислений. В тоже время она имеет достаточную для инженерных расчетов точность.

В перспективе предполагается варьирование углов наклона к

горизонталы линии изменения условной высоты сечения, а также замену прямой линии на кривую с целью уточнения результатов расчета.

Список использованной литературы

1. Азизов Т.Н. Жесткость железобетонных элементов при кручении и ее влияние на пространственную работу мостов // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій// Збірник наукових праць. НАН України. Фізико-мех.інститут ім.. В.Г. Карпенка. – Львів, 2009. – С. 576-590.

2. Азизов Т.Н., Мельник А.В, Парамонов Д.Ю. НДС и прочность железобетонных балок с нормальными трещинами при кручении// Зб. наук. праць. Серія «Галузеве машинобудування, будівництво», вип. 3 (25) – Том 3. Полтава: ПолтНТУ, 2009. – С. 9-13.

3. Азизов Т.Н. Пространственная работа железобетонных перекрытий. Теория и методы расчета: Дисс. ... докт. техн. наук: 05.23.01 / Полтавский национальный технический университет. – Полтава, 2006. – 406 с.

4. Арутюнян Н.Х., Абрамян Б.Л. Кручение упругих тел.. М.: Физматгиз, 1963. – 688 с.

5. Горнов В.Н. Исследование прочности и жёсткости сборных железобетонных перекрытий из лотковых настилов // Материалы и конструкции в современной архитектуре. – М.: Стройиздат, 1950.

6. Дроздов П.Ф. Конструирование и расчёт несущих систем многоэтажных зданий и их элементов. – М.: Стройиздат, 1977. – 223 с.

7. Залесов А.С., Климов Ю.А. Прочность железобетонных конструкций при действии поперечных сил. – Киев: Будівельник, 1989. – 105 с.

8. Карабанов Б.В. Нелинейный расчет сборно-монолитных железобетонных перекрытий // Бетон и железобетон. – 2001. - №6. - С. 14-18.

9. Карпенко Н.И. общие модели механики железобетона. – М.: Стройиздат, 1996. – 416 с.

10. Карпенко Н.И. Теория деформирования железобетона с трещинами. М.: Стройиздат, 1976. – 208 с.

11. Коуэн, Г.Дж. Кручение в обычном и предварительно напряженном железобетоне: Пер. с англ. / Г.Дж. Коуэн; – М.: Изд-во литературы по строительству, 1972. – 104 с.

12. Кочкаръов Д.В. Нелінійний опір залізобетонних елементів і конструкцій силовим впливам. – Рівне: О.Зень, 2015. – 384 с.

13. Феодосьев В.И. Сщпротивление материалов., Ъ.: Наука, 1970. – 544 с.

14. AzizovT., KochkarevD. Rigiditi and Torsional Strength of Reinforced Concrete Bars with Normal Cracks // SciencesofEurope. – 2020. – Vol 1, № 47. – С. 27-36.