

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток промисловості дав змогу виробляти та застосовувати у будівельній сфері різні матеріали, однак конструкції із залізобетону залишають за собою провідне місце в різних напрямках будівництва завдяки своїм характеристикам та позитивним якостям.

Важливою відмінністю залізобетонних елементів є утворення тріщин, яке суттєво впливає на напружено-деформований стан (НДС), веде до перерозподілу зусиль в статично невизначених системах та змінює жорсткість залізобетонних елементів як під час згину, так і під час кручення. Багатогранне використання залізобетону ставить перед науковцями завдання подальшого розвитку теорії та удосконалення методів розрахунку залізобетонних конструкцій.

Різні будівельні конструкції: плити перекриття, балки з боковими консолями, коробки-опори, траверси та ін. підлягають згину з крученням. Неврахування крутних моментів під час розрахунків зазначених конструкцій може призвести до їх руйнувань під впливом різних навантажень.

Деформація кручення, яка може виникнути внаслідок позацентрового прикладання вертикального навантаження або в інших випадках, являє собою складний процес, який в свою чергу, до кінця не з'ясований і потребує більш поглибленого вивчення.

Переважна кількість робіт, яка присвячена вивченню кручення в залізобетонних елементах, стосується в основному дослідженню їх міцності. Питання деформативності залізобетонних елементів, що зазнають деформацій кручення, вивчались в обмеженій кількості.

Існуючі методики визначення жорсткості елементів на кручення стосуються в основному залізобетонних елементів з просторовими (спіральними) тріщинами, питання визначення жорсткості елементів з нормальними тріщинами не розглядались.

Відносно недавно розпочаті дослідження жорсткості залізобетонних елементів з нормальними тріщинами за дії крутних моментів, які знаходяться на початковому етапі свого розвитку і стосуються елементів прямокутного та таврового перерізу.

Елементи коробчастого перерізу зустрічаються у будівництві досить часто, як в окремих залізобетонних елементах – балках, так і у складі конструкцій – залізобетонних балочних мостів. Балки коробчастого перерізу, які мають велику жорсткість на кручення, знайшли своє застосування в будівництві автодорожних мостів великих прольотів. Є перспективним, з точки зору полегшення маси конструкцій і будівлі в цілому, застосування коробчастих настилів з легких бетонів. Тому розвиток методики визначення жорсткості на кручення елементів з нормальними тріщинами коробчастого перерізу є досить **актуальним** завданням, вирішення якого дозволить отримати економічний ефект з одночасним підвищенням надійності конструкцій.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Дисертаційна робота виконана в рамках держбюджетної науково-дослідної теми «Розробка розрахункових моделей залізобетонних конструкцій при складному напружено-деформованому стані приопорних ділянок» (номер державної реєстрації 0108U000559) кафедри опору матеріалів Одеської державної академії будівництва та архітектури.

Мета роботи – Розвиток методики визначення жорсткості на кручення залізобетонних елементів з нормальними тріщинами на елементи коробчастого перерізу, розроблення інженерної методики розрахунку їх жорсткості та міцності.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані такі **задачі**:

- розвинути чисельно-аналітичну методику визначення жорсткості на кручення залізобетонних елементів з нормальними тріщинами прямокутного та таврового перерізу на елементи коробчастого перерізу;

- провести експериментальні дослідження деформативності та міцності коробчастих залізобетонних елементів з нормальними тріщинами за дії кручення;

- розробити чисельну методику визначення жорсткості на кручення залізобетонних елементів коробчастого перерізу з нормальними тріщинами з врахуванням нелінійних властивостей бетону;

- розробити інженерні методики розрахунку жорсткості та міцності залізобетонних елементів коробчастого перерізу з нормальними тріщинами, які зазнають деформації кручення;

- розробити комп'ютерну програму для автоматизованого визначення жорсткісних та міцнісних параметрів елементів коробчастого перерізу з нормальними тріщинами при крученні.

Об'єкт дослідження – залізобетонні елементи коробчастого перерізу з нормальними тріщинами.

Предмет дослідження – жорсткість та міцність залізобетонних елементів коробчастого перерізу з нормальними тріщинами за дії кручення.

Методи дослідження – метод комп'ютерного моделювання конструкцій із застосуванням програмних комплексів, що реалізують метод скінченних елементів (під час проведення чисельних досліджень); чисельно-аналітичний метод з використанням диференціальних рівнянь і методів диференціального й інтегрального розрахунку (є розвитком чисельно-аналітичної методики визначення жорсткості на кручення залізобетонних елементів з нормальними тріщинами); експериментальні дослідження на фізичних зразках; застосування програмного комплексу «Mathcad» (під час створення комп'ютерної програми визначення параметрів жорсткості та міцності на кручення досліджуваних залізобетонних елементів).

Наукова новизна роботи полягає в тому, що вперше:

- експериментально отримані залежності «крутний момент-кут закручування» для елементів коробчастого перерізу з нормальними тріщинами, армованих поздовжньою арматурою;

- отримані експериментальні залежності руйнівного крутного моменту для елементів коробчастого перерізу з нормальними тріщинами;

- розроблена чисельна методика визначення жорсткості на кручення залізобетонних елементів коробчастого перерізу з нормальними тріщинами з урахуванням нелінійних властивостей бетону та використанням МСЕ;

- розроблені інженерні методики визначення жорсткості та міцності при крученні залізобетонних елементів коробчастого перерізу з нормальними тріщинами;

Отримала подальший розвиток чисельно-аналітична методика визначення жорсткості на кручення елементів з нормальними тріщинами, яка розвинута на елементи коробчастого перерізу.

Практичне значення дисертаційної роботи полягає в тому, що отримані результати дослідження та запропонована методика визначення жорсткості та міцності дозволяють уточнити величини внутрішніх зусиль в елементах залізобетонних систем коробчастого перерізу з нормальними тріщинами, а також оцінити їх міцність.

Впровадження результатів роботи. Результати дослідження впроваджені: ДП НДІБК при розробці національного стандарту України ДСТУ Б В.2.6-156:2010 «Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування» в частині розрахунку просторових перерізів балкових елементів та плит; Науково-виробничим підприємством «Будівельна наука» Академії будівництва України м.Суми вул. Петропавлівська, 108 під час проектування і обстеження театру юного глядача за адресою: м. Суми вул. Покровська, 6 та споруди блоку допоміжних цехів за адресою: м. Суми вул. Білопольське шосе, 15; Проектно-будівельною фірмою ПП «ИНЖПРОЕКТ – 2» під час розробки проекту реконструкції адміністративного корпусу ЗАТ «Технолог» м.Умань, вул. Мануїльського, 8.

Особистий вклад здобувача:

- участь в розробці чисельно-аналітичної методики визначення жорсткості на кручення залізобетонних елементів коробчастого перерізу з нормальними тріщинами;

- підготовка та проведення експериментальних досліджень, статистична обробка та аналіз результатів експерименту;

- участь в розробці чисельної методики визначення жорсткості на кручення залізобетонних елементів коробчастого перерізу з нормальними тріщинами з урахуванням нелінійних властивостей бетону;

- участь в розробці інженерних методик визначення жорсткості та міцності при крученні залізобетонних елементів коробчастого перерізу з нормальними тріщинами;

- формулювання основних положень, які визначають наукову новизну.

Апробація результатів роботи. Основні положення та результати дисертації доповідались на конференціях: міжнародна науково-практична конференція «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика» (м. Дніпропетровськ, 27-28 травня 2010 р.); міжнародна науково-практична конференція «Будівельні конструкції будівель та споруд (проектування, виготовлення, реконструкція, обслуговування), споруди баштового типу (матеріали, конструкції, технології)» (м. Донецьк, с.м.т. Макєєвка, 6-8 вересня 2011 р.); сьома науково-технічна конференція «Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди» (м. Рівне, 27-29 вересня 2011 р.).

Публікації. Основні положення дисертації та результати експериментальних досліджень опубліковані в 6-ти статтях, у видавництвах, рекомендованих ВАК України.

Об'єм та структура роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних літературних джерел та 6-ти додатків.

Дисертація викладена на 256 сторінках, в тому числі: 120 сторінок основного тексту, 60 рисунків, 7 таблиць, 27 сторінок списку використаних джерел (207 найменувань), 90 сторінок додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету та поставлені задачі досліджень; визначено наукову новизну та практичне значення роботи; наведено методи досліджень; вказаний особистий внесок здобувача, а також відомості щодо апробації та впровадження результатів дисертаційної роботи.

У **першому розділі** наведено огляд відомих теоретичних та експериментальних досліджень стосовно жорсткості та міцності залізобетонних елементів на кручення. Зазначено, що просторова робота залізобетонних перекриттів, мостів та інших статично невизначених конструкцій значно впливає на їхній напружено-деформований стан.

Теоретичним розрахункам, експериментальним дослідженням просторової роботи монолітних та збірних залізобетонних перекриттів присвятили свої праці такі вчені: Т.Н. Азізов, Р.Л. Айвазов, К.М. Арзуманян, В.М. Байков, А.І. Бєдов, О.І. Верещага, В.З. Власов, Б.Г. Гнідець, В.Н. Горнов, А.Л. Гуревич, М.І. Додонов, В.С. Дорофєєв, П.Ф. Дроздов, В.Г. Крамарь, А.І. Лантух-Лященко, С.Е. Левін, Б.П. Назаренко, П.Л. Пастернак, Н.І. Поліванов, О.С. Савченко, О.С. Семченков, І.А. Тріфонов, Б.Є. Уліцький, В. А. Уткін, О.Л. Шагін, В.С. Шмуклер, L. Lubel, P. Lutrin та інші.

Дослідженнями залізобетонних елементів на згин з крученням займались багато вчених: Є.М. Бабич, А.Я. Барашиков, З.Я. Бліхарський, В.М. Бондаренко, П.Ф. Вахненко, М.С. Жорняк, О.С. Залєсов, М.І. Карпенко, Д.Х.

Касаєв, О.М. Клюка, Г. Коуен, А.М. Кузьменко, О.Н. Печеник, А.Г. Сафонов, О.В. Семко, Л.В. Фалєєв, В.К. Юдин, Т.С.Hsu Thomas та інші.

В зазначених роботах авторів, а також у інших теоретичних та експериментальних дослідженнях показаний вплив просторової роботи перекриттів, мостів та інших статично невизначених конструкцій на їхній напружено-деформований стан. В свою чергу на перерозподіл зусиль між окремими елементами таких систем мають вплив як жорсткість на згин, так і жорсткість на кручення, що при звичайному способі проектування не враховується.

Визначенню міцності та деформативності залізобетонних балок за дії згину присвячено багато наукових робіт. В той же час дослідженню напружено-деформованого стану елементів за дії кручення відведено не достатньо уваги та й в основному роботи присвячені елементам з просторовими спіральними тріщинами. Методика визначення напружено-деформованого стану залізобетонних елементів з нормальними тріщинами знаходиться на початковому етапі свого розвитку і стосується елементів прямокутного та таврового перерізу. Особливо багато питань виникає під час розрахунків елементів з порожнистим поперечним перерізом. Тому, удосконалення методики їх розрахунку за дії кручення є актуальним завданням, рішення якого дозволить отримати економічний ефект з одночасним підвищенням надійності конструкцій.

У залізобетонних конструкціях кручення елементів у чистому вигляді майже не зустрічається, але у поєднанні зі згином - вельми часто. У порівнянні опір залізобетонних елементів на згин значно більший ніж на кручення. Тому у конструкціях, не дивлячись на відносно невеликі по абсолютному значенню крутні моменти необхідно обов'язково враховувати.

Найбільш ефективним та достовірним методом розрахунку балок, що працюють на згин з крученням є метод запропонований С.Ф. Клованічем, який добре моделюється за допомогою просторових скінченних елементів. Недоліком використання методу скінченних елементів (МСЕ) є відносна складність створення розрахункових схем та велика кількість невідомих, що в свою чергу ускладнює розрахунки, складних просторових конструкцій.

Крім цього, арматуру не розміщують дискретно, а враховують по усьому елементу скінченного елемента.

Недавно Т.Н. Азізов та його учні запропонували методику визначення жорсткості на кручення залізобетонних елементів з нормальними тріщинами, в якій розглядаються залізобетонні елементи прямокутного та таврового перерізу.

Зазначена методика перебуває на початковому етапі та потребує більш досконального вивчення, удосконалення та розвитку на елементи іншого перерізу, в тому числі і коробчастого перерізу, які в свою чергу є об'єктом дослідження дисертації.

Із проведеного огляду літератури у першому розділі поставлені задачі дослідження.

У **другому розділі** запропоновано чисельно-аналітичну методику визначення жорсткості на кручення залізобетонних елементів коробчастого перерізу з нормальними тріщинами без врахування та з врахуванням тріщиноутворення, що є розвитком методики для елементів прямокутного та таврового перерізу. Також в розділі показана методика чисельних досліджень по МСЕ жорсткості залізобетонних елементів коробчастого перерізу з нормальними тріщинами.

Розглянемо схему залізобетонного елемента з нормальними тріщинами (рис. 1). Для визначення жорсткості основним завданням є визначення переміщень точок C і C' (рис. 2). Повороту блока A , до якого прикладений крутний момент M_b , відносно суміжного блока B чинить опір не тільки зона без тріщин (рис. 2), а й арматура. Основне завдання для визначення нагельної сили в арматурі Q , буде полягати у визначенні переміщень блока A відносно блока B у місці умовного розтину арматури (точки C і C'). Знайшовши переміщення, а потім невідому нагельну силу Q можна визначити зусилля та напруження у зоні без тріщин.

Для рішення задачі, визначення НДС в елементах коробчастого перерізу з нормальними тріщинами застосуємо теорію запроповану Б.Е. Уліцким, у якій під час просторових розрахунків прогінних будівель мостів конструкцію умовно розтинають на окремі повздовжні елементи. Подальші етапи розрахунку пов'язані з визначенням деформацій та зусиль, а також переміщення різних частин перерізу.

Використовуючи підхід прийнятий Б.Е. Уліцким розділимо коробчастий елемент на окремі пластини (рис. 3).

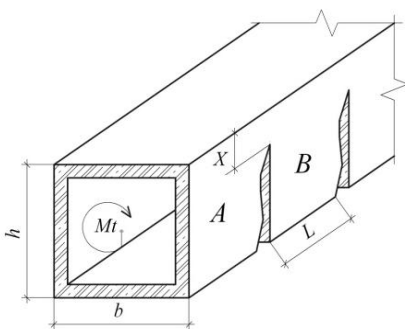


Рис. 1. Схема залізобетонного елемента з нормальними тріщинами, завантаженого крутним моментом

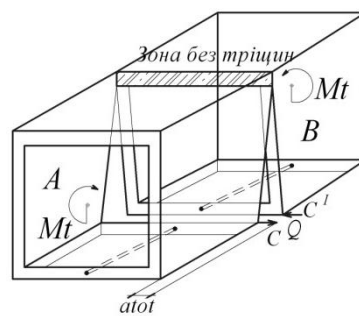


Рис. 2. Переміщення блоку A відносно блоку B , відділених нормальною тріщиною

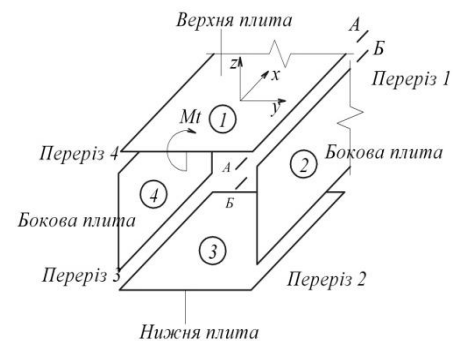


Рис. 3. Схема розділення коробчастого елемента на окремі пластини

По лініях розтину в загальному випадку будуть діяти невідомі зусилля $S(x)$, $T(x)$, $H(x)$, та моменти $m(x)$ (рис. 4,5).

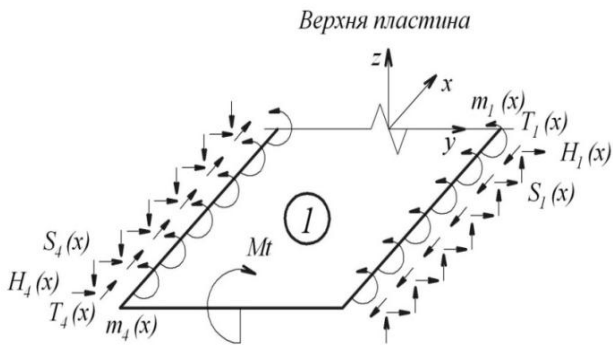


Рис. 4. Схема зусиль, які діють по лініях розтину в верхній пластині

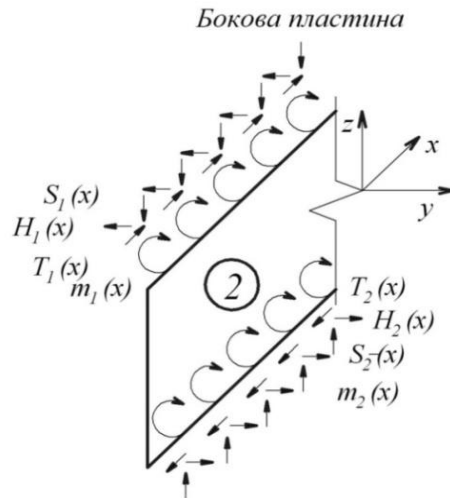


Рис. 5. Схема зусиль, які діють по лініях розтину в боковій пластині

Зовнішній момент Mt , невідомі зусилля $T(x)$, $S(x)$, $H(x)$ і моменти $m(x)$ зручно виразити розклавши їх в ряди Фур'є:

$$\left. \begin{aligned} Mt &= \sum_{n=1}^{\infty} Mt_n \cdot \sin \alpha x; \\ T(x) &= \sum_{n=1}^{\infty} T_n \cdot \sin \alpha x; \\ S(x) &= \sum_{n=1}^{\infty} S_n \cdot \sin \alpha x; \\ H(x) &= \sum_{n=1}^{\infty} H_n \cdot \sin \alpha x; \\ m(x) &= \sum_{n=1}^{\infty} m_n \cdot \sin \alpha x. \end{aligned} \right\} (1)$$

де

T_n , S_n , H_n , m_n – невідомі коефіцієнти Фур'є, визначивши які можна отримати закони зміни невідомих функцій відповідно $T(x)$, $S(x)$, $H(x)$ та $m(x)$.

Для скорочення об'ємних викладок розглянемо вертикальні переміщення для перерізу 1 (рис. 6).

1. Вертикальне переміщення правої кромки пластини 1:

$$W_{np}^1 = W_{np, Mt}^1 - W_{np, S1}^1 - W_{np, S4}^1 - W_{np, m1}^1 + W_{np, m4}^1 \quad (2)$$

де

- $W_{np, Mt}^1$; $W_{np, S1}^1$; $W_{np, S4}^1$; $W_{np, m1}^1$; $W_{np, m4}^1$ - вертикальне переміщення правої кромки пластини 1 від відповідного зовнішнього моменту Mt ; сил S_1 , S_4 , погонних моментів m_1 , m_4 .

Вертикальне
переміщення

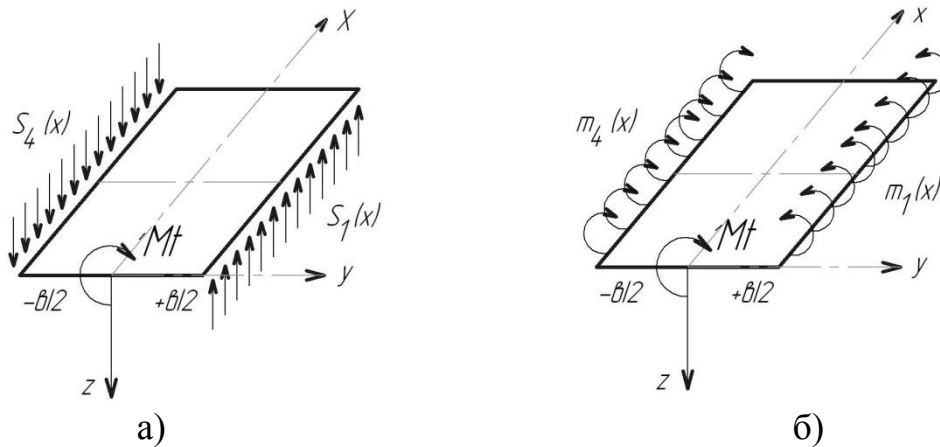


Рис. 6. Напрямки переміщень: а) від сил $S_1(x)$, $S_4(x)$; б) від моментів $m_1(x)$, $m_4(x)$.

2. Вертикальне переміщення правої кромки пластини 2 :

$$W_{np}^2 = W_{np,S1}^2 - W_{np,T1}^2 \quad (3)$$

де

- $W_{np,S1}^2$; $W_{np,T1}^2$ - вертикальне переміщення правої кромки пластини 2 від відповідних сил S_1 , T_1 .

Використовуючи умову сумісності деформацій прирівнюємо вертикальні переміщення для пластини 1 і пластини 2.

Кутові, поперечні та повздовжні переміщення визначаються подібно вертикальним. Тоді отримаємо перші чотири рівняння системи для перерізу 1.

$$\begin{aligned} W_{np,Mt}^1 - W_{np,S1}^1 - W_{np,S4}^1 - W_{np,m1}^1 + W_{np,m4}^1 &= W_{np,S1}^2 - W_{np,T1}^2; \\ \varphi_{np,Mt}^1 - \varphi_{np,S1}^1 - \varphi_{np,S4}^1 - \varphi_{np,m1}^1 + \varphi_{np,m4}^1 &= \varphi_{np,m1}^2 - \varphi_{np,m2}^2 - \varphi_{np,H1}^2 - \varphi_{np,H2}^2; \\ V_{np,H1}^1 - V_{np,T1}^1 &= -V_{np,H1}^2 - V_{np,H2}^2 + V_{np,m1}^2 - V_{np,m2}^2; \\ U_{np,H1}^1 - U_{np,T1}^1 &= U_{np,T1}^2 - U_{np,S1}^2. \end{aligned} \quad (4)$$

де

- $\varphi_{np,Mt}^1$; $\varphi_{np,S1}^1$; $\varphi_{np,S4}^1$; $\varphi_{np,m1}^1$; $\varphi_{np,m4}^1$ - кутові переміщення правої кромки пластини 1 від відповідного зовнішнього моменту Mt , сил S_1 , S_4 , погонних моментів m_1 , m_4 ;

- $\varphi_{np,m1}^2$; $\varphi_{np,m2}^2$; $\varphi_{np,H1}^2$; $\varphi_{np,H2}^2$ - кутові переміщення правої кромки пластини 2 від погонних моментів m_1 , m_2 , сил H_1 , H_2 ;

- $V_{np,H1}^1$; $V_{np,T1}^1$ - поперечні переміщення правої кромки пластини 1 від відповідних сил H_1 , T_1 ;

- $V_{np,H1}^2$; $V_{np,H2}^2$; $V_{np,m1}^2$; $V_{np,m2}^2$ - поперечні переміщення правої кромки пластини 2 від відповідних сил H_1 , H_2 , погонних моментів m_1 , m_2 ;

- $U_{np,H1}^1$; $U_{np,T1}^1$ - повздовжні переміщення правої кромки пластини 1 від відповідних сил H_1 , T_1 ;

- $U_{np,T1}^2; U_{np,S1}^2$ - поздовжні переміщення правої кромки пластини 2 від відповідних сил T_1, S_1 .

Вертикальні, поздовжні, поперечні та кутові переміщення для перерізів 2,3,4 визначаються аналогічно як для перерізу 1.

Складові системи рівнянь визначаються за методикою Б.Е. Уліцкого.

Підставляючи константи у ряди, а ряди в рівняння, прирівнюючи відповідні члени рядів в лівих і правих частинах цих рівнянь отримаємо систему шістнадцятьох лінійних алгебраїчних рівнянь для невідомих коефіцієнтів Фур'є шуканих зусиль. Система рівнянь без особливої складності вирішується за допомогою програмного комплексу Mathcad.

Зворотна підстановка знайдених числових значень коефіцієнтів s_n, t_n, h_n, m_n в ряди визначає шукані функції зусиль $S(x), T(x), H(x)$, та моментів $m(x)$, які можна дослідити.

Перевагою даного методу є те, що чисельний розв'язок системи рівнянь може бути отриманий за різних геометричних та фізичних параметрів задачі.

Недоліком даного методу є те, що врахування нелінійних властивостей бетону та різного виду тріщин є неможливим, тому що теорія Б.Е. Уліцкого передбачає, що окремі елементи на які умовно розтинається блок між нормальними тріщинами розраховується за методами теорії пружності як суцільне ізотропне тіло.

Відомо, що важливою відмінністю залізобетонних елементів є утворення нормальних тріщин.

В даний час для визначення НДС використовуються, як правило, чисельні методи, насамперед МСЕ з застосуванням програмних комплексів (таких, як «Ліра», «Скад» та ін), але врахування різного виду тріщин та нелінійних властивостей бетону дуже ускладнює рішення такої задачі.

Для спрощення рішення задачі застосуємо підхід, прийнятий професором Т.Н. Азізовим, де для визначення напружено-деформованого стану плитних конструкцій приймається стрижнева апроксимація. Розіб'ємо коробчастий елемент поздовжніми площинами на окремі пластини з одночасним розбиттям на умовні одиничні стрижні (рис. 7) для можливості врахування нелінійних властивостей бетону та різного виду тріщин.

По лініях розтину в загальному випадку діятимуть невідомі зусилля $S(x), T(x), H(x)$, та моменти $m(x)$.

Спільна лінія розтину перерізу 1 від зазначених вище зусиль $S_1(x), H_1(x), T_1(x)$ та моментів $m_1(x)$ зазнає відповідних вертикальних, горизонтальних, кутових та поздовжніх переміщень.

1. Кривизна в вертикальному напрямку (друга похідна вертикального переміщення) для верхньої плити :

від зовнішнього крутного моменту M_t ; від кручення силами S_1 та S_4 ; від кручення моментами m_1 та m_4 ; від згину плити (умовних стрижнів одиничної ширини) в поперечному напрямку силою S_1 ;

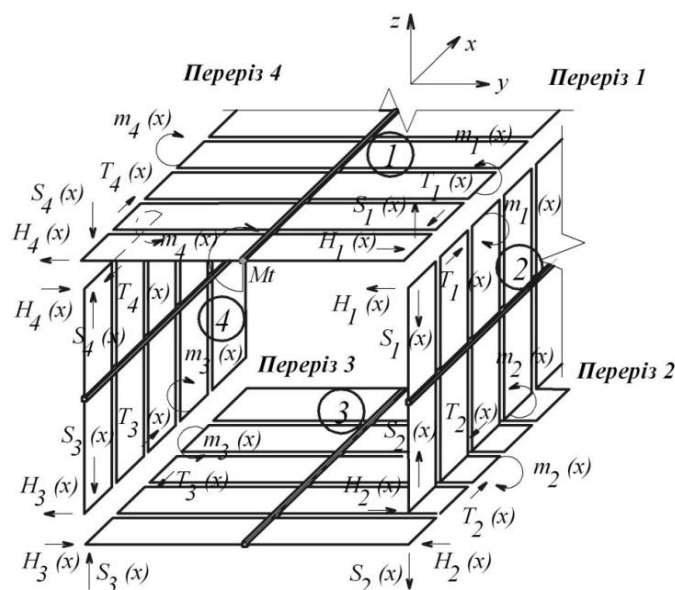


Рис. 7. Схема зусиль, які діють по лініях розтину коробчастого елемента

від згину плити (умовних стрижнів одиничної ширини) в поперечному напрямку моментами m_1 ; від згину плити в вертикальному напрямку (як елемента) силами S_1, S_4 .

2. Другі похідні вертикальних переміщень для бокової плити (рис. 5):

від згину плити в вертикальному напрямку силами S_1, S_2 ; від згину плити дотичними силами T_1, T_2 ; від стиску - розтягу силами S_1 .

Використовуючи умову сумісності деформацій для першої і другої пластини отримаємо перше диференціальне рівняння системи для вертикальних переміщень перерізу 1.

$$\frac{b \cdot M_t'}{GJt_1} - \frac{b^2 \cdot MS_1''}{GJt_1} - \frac{b^2 \cdot MS_4''}{GJt_1} - \frac{b \cdot m_1}{GJt_1} + \frac{b \cdot m_4}{GJt_1} - \frac{b^3 \cdot MS_1^{IV}}{3Dz_1} - \frac{b^2 \cdot m_1''}{2Dz_1} - \frac{MS_1}{EJz_1} + \frac{MS_4}{EJz_1} = \frac{MS_1}{EJz_2} - \frac{MS_2}{EJz_2} - \frac{h \cdot T_1}{EJz_2} - \frac{h \cdot T_2}{EJz_2} + \frac{h \cdot MS_1^{IV}}{EFz_2} \quad (5)$$

де

M_t – зовнішній крутний момент;

GJt_1 – жорсткість на кручення верхньої плити (плити 1);

b, h – половина ширини відповідно верхньої та бокової плит;

MS_1, MS_4 – згинальні моменти, що виникають від погонних вертикальних зусиль S_1 та S_4 відповідно в перерізах 1 та 4;

m_1, m_4 – погонні поперечні згинальні моменти відповідно в перерізах 1, 4;

Dz_1 – згинальна жорсткість в напрямку осі Z умовного поперечного стрижня одиничної ширини для плити 1;

EJz_1, EJz_2 – згинальна жорсткість відповідно плити 1, 2 в напрямку осі z ;

EFz_2 – осьова жорсткість умовного стрижня одиничної ширини для плити 2 при розтягу-стиску в напрямку осі z .

Кутові, поперечні та повздовжні переміщення визначаються подібно вертикальним, як для перерізу 1 так і для перерізів 2, 3, 4.

Всього, таким чином, отримаємо шістнадцять диференціальних рівнянь.

Розв'язок системи зручно здійснювати за допомогою розкладання невідомих зусиль у ряди Фур'є.

$$\left. \begin{aligned} S(x) &= \sum_{n=1}^m \alpha_n^2 \cdot MS_n \cdot \cos\left(\frac{n\pi x}{l}\right); \\ m(x) &= \sum_{n=1}^m m_n \cdot \cos\left(\frac{n\pi x}{l}\right); \\ H(x) &= \sum_{n=1}^m \alpha_n^2 \cdot MH_n \cdot \cos\left(\frac{n\pi x}{l}\right); \\ \tau(x) &= \sum_{n=1}^m \alpha_n \cdot T_n \cdot \cos\left(\frac{n\pi x}{l}\right). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

де $\alpha = \frac{\pi \cdot n}{l}$; MS_n, m_n, MH_n, T_n - коефіцієнти Фур'є відповідних функцій зусиль, які підлягають визначенню.

Підставивши ряди у систему диференціальних рівнянь та прирівнявши відповідні члени рядів в лівих і правих частинах цих рівнянь і скоротивши на $\cos(\alpha \cdot x)$, отримуємо систему 16 лінійних рівнянь, де невідомими будуть коефіцієнти рядів Фур'є MS_n, m_n, MH_n, T_n шуканих невідомих зусиль та моментів. Система без складності вирішується за допомогою програми Mathcad.

Перевагою даного методу є те, що в розрахунках можна враховувати різні види тріщиноутворення та нелінійні властивості бетону. Недоліком є те, що отримані результати є наближеними у порівнянні із результатами отриманими по чисельній методиці або по методиці запропонованій вище за теорією Б.Е. Уліцкого.

Третій розділ дисертації присвячений методиці проведення та результатам експериментального дослідження залізобетонних зразків коробчастого перерізу з нормальними тріщинами на предмет визначення їхньої жорсткості на кручення та міцності. Всього було випробувано 24 залізобетонні зразки коробчастого перерізу розміром 200x200x1000 мм, чотири серії по 6 в кожній, 4 з яких, з імітацією нормальних тріщин. Зразки армовані стрижнем з арматури періодичного профілю класу А500С діаметром 8,10 та 14 мм (рис. 8).

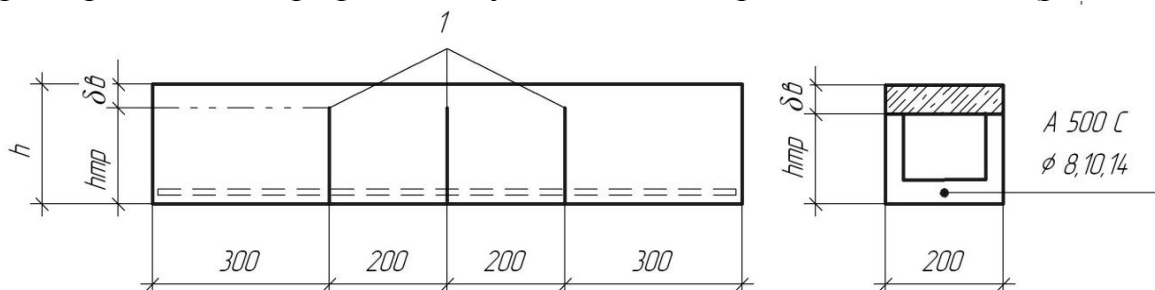


Рис. 8. Схема експериментального зразка, 1- вставка із пластику

Опорні частини експериментальних зразків для передбачення раптових руйнувань армувалися по периметру сіткою, як показано на схемі рис. 9.

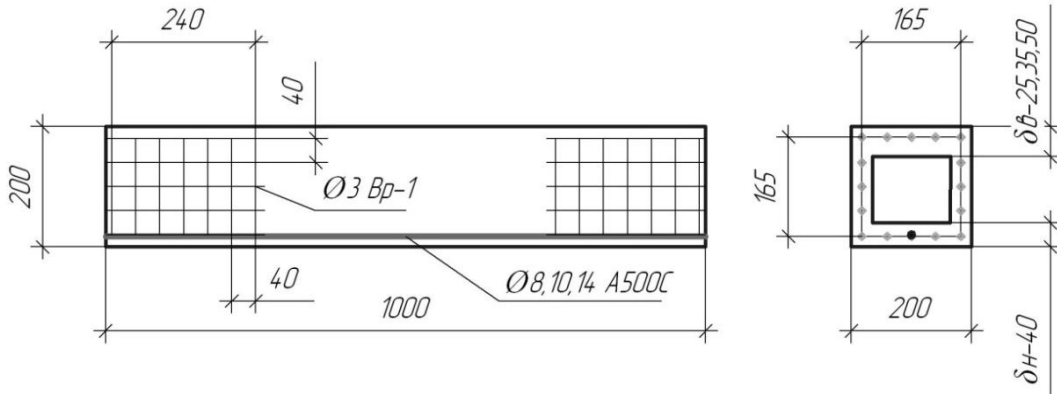


Рис. 9. Схема армування експериментальних зразків

Зразки відрізнялися різною висотою тріщини та різним діаметром поздовжньої арматури (рис. 8,9).

Штучні нормальні тріщини розділяли зразки по довжині на окремі блоки, зв'язані між собою через суцільну зону перерізу висотою X і арматуру (рис. 1,2).

На рис. 10 показано загальну схему експериментальної установки для випробування експериментальних зразків.

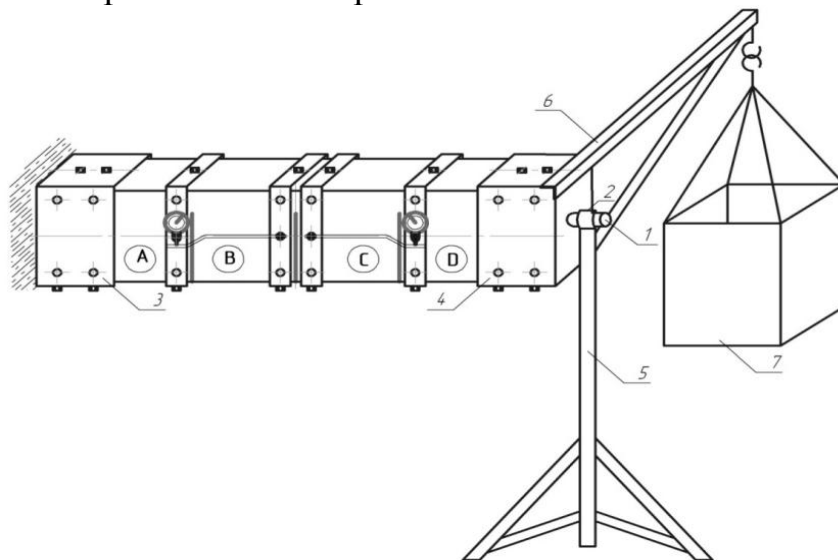


Рис. 10. Загальна схема експериментальної установки:

1–шарнірний вал, приварений до опорного коробу; 2–втулка; 3–короб, приварений жорстко; 4–короб, на шарнірній опорі; 5–стійка; 6–ричаг; 7–піддон з важелями.

Випробування проводилися з метою встановлення характеру зміни параметрів жорсткості зразків з різною висотою зони без тріщин та різними діаметрами поздовжньої арматури. Навантаження зразків відбувалося етапами з витримкою під навантаженням протягом 10 хвилин (рис. 10).

Переміщення центральних блоків відносно крайніх вимірялися індикаторами годинникового типу (рис. 11).

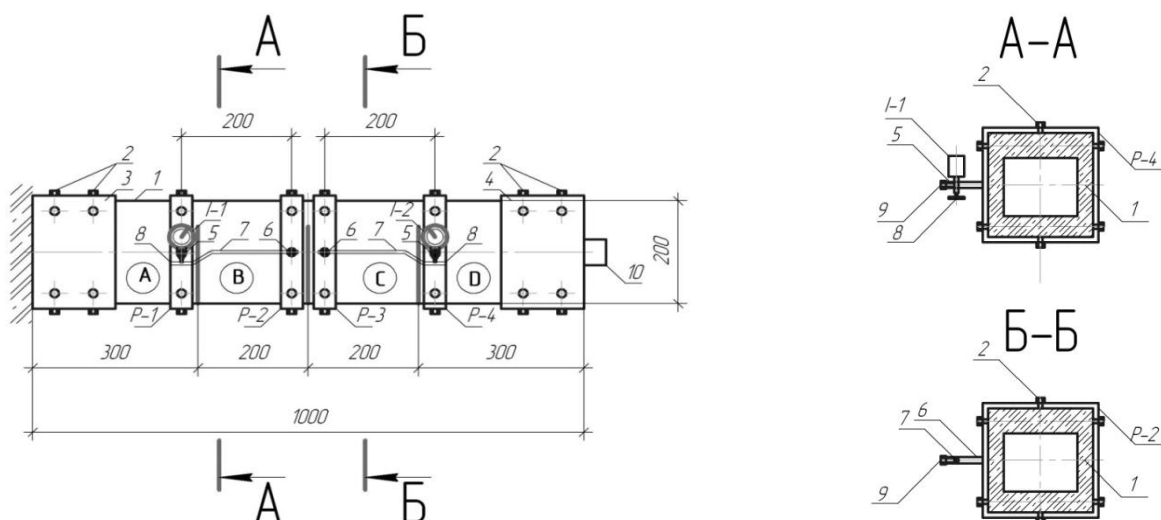


Рис. 11. Схема виміру переміщення блоків, відокремлених один від одного нормальною тріщиною:

I-1, I-2 – індикатори часового типу; *P-1, P-2, P-3, P-4* – сталеві рамки; 1 – експериментальний зразок; 2 – прижимні болти; 3 – опорний короб; 4 – опорний короб з шарнірним валом; 5 – утримувач із круглої сталі під індикатор; 6 – утримувач із круглої сталі під пруттик; 7 – пруттик; 8 – сталеві пластинки під індикатор; 9 – прижимний болт для індикатора і прутка в утримувачах; 10 – шарнірний вал.

На рис. 12 показаний графік залежності «крутний момент-кут закручування» при різній висоті зони без тріщин.

На рис. 13 показаний графік залежності «крутний момент-кут закручування» при різних діаметрах поздовжньої арматури.

На графіках спостерігається чітка залежність: чим більший діаметр арматури і більша висота зони без тріщин тим залежність «крутний момент-кут закручування» стає більш лінійною.

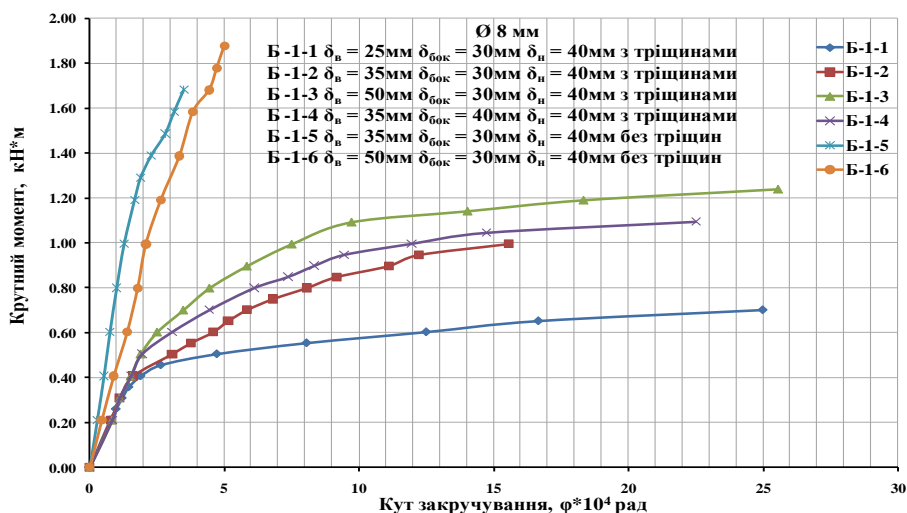


Рис. 12. Залежність „крутний момент-кут закручування” при висоті зони без тріщин: 25 мм; 35 мм; 50 мм.

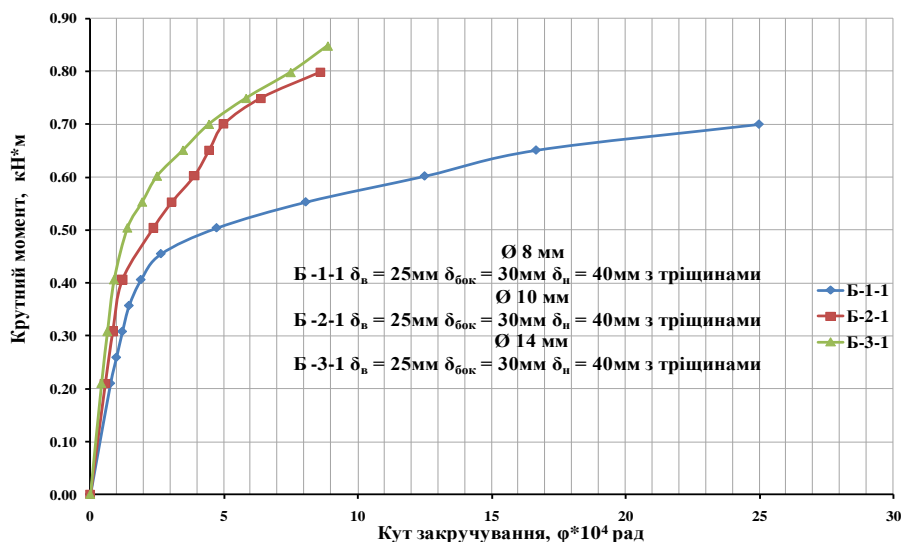


Рис. 13. Залежність „крутий момент-кут закручування” при діаметрі поздовжньої арматури: Ø8 мм; Ø 10 мм; Ø 14 мм.

Після обробки експериментальних даних можна зробити наступні висновки:

- залізобетонні елементи коробчастого перерізу з нормальними тріщинами, які зазнавали деформації кручення, мали графік залежності «крутий момент-кут закручування» криволінійної форми, що підтверджує пружно-пластичний характер деформування зразків. Пластичні деформації з'являлись на останніх етапах завантаження. В зразках з малим діаметром арматури пластичні деформації виникали при меншому рівні навантаження ніж в зразках з більшим діаметром арматури;

- із збільшенням товщини верхньої полки і бокових стінок коробчастого поперечного перерізу та діаметра арматури деформування зразків з нормальними тріщинами, армованих тільки поздовжньою арматурою, наближається до пружного;

- основний вид руйнування – це руйнування верхньої зони без тріщин від дії напружень на розтяг по похилих площадках. Ці напруження виникають в результаті дії крутного моменту, який сприймає безпосередньо верхня полка зразка;

- армування експериментальних зразків з нормальними тріщинами тільки поздовжньою арматурою впливає на їх міцність на кручення, але при цьому зразки мають крихкий та миттєвий характер їх руйнування;

- збільшення діаметра арматури та товщини верхньої полки і бокових стінок поперечного перерізу зразків призводять до зменшення деформацій та збільшення міцності на кручення.

В четвертому розділі запропоновано методику визначення жорсткості на кручення з врахуванням нелінійних деформацій та інженерну методику визначення міцності на кручення залізобетонних елементів коробчастого перерізу з нормальними тріщинами.

Розглянемо схему нелінійного деформування арматури від взаємного повороту блоків, що зазнали крутного моменту M_t (рис. 14).

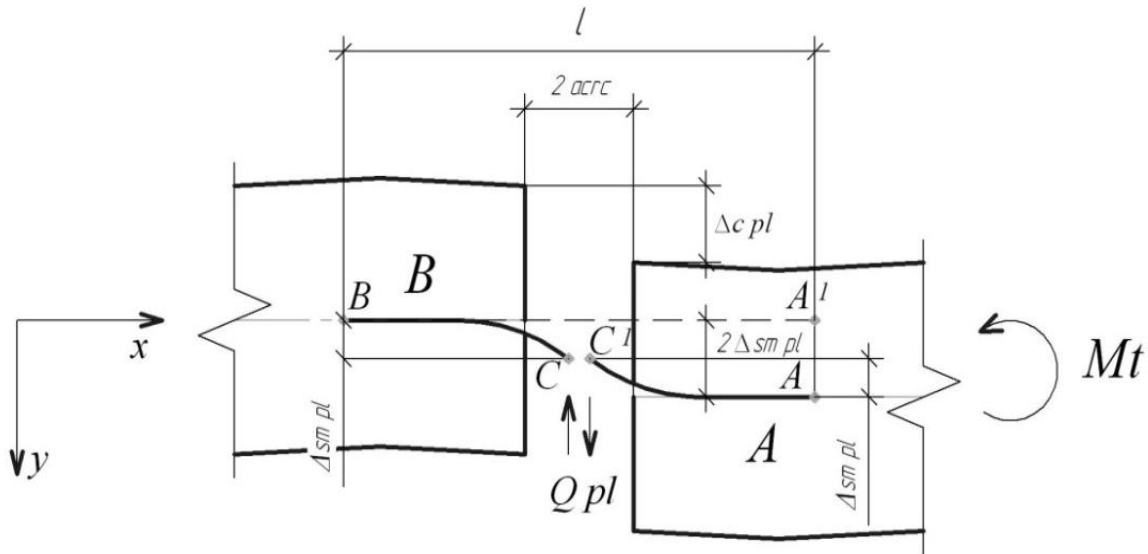


Рис. 14. Схема нелінійного деформування арматури від взаємного повороту блоків, що зазнали крутного моменту

Нагельну силу Q , яка виникає у повздовжній арматурі визначимо використовуючи МСЕ за допомогою програмного комплексу «Ліра» з врахуванням нелінійних властивостей бетону.

Нелінійне переміщення точки C відносно точки C^d у місці умовного розтину арматури повинно бути рівним нулю (рис. 14):

$$\Delta_{Cpl} = \Delta_{Mtpl} - \Delta_{Qpl} - \Delta_{smpl} = 0 \quad (7)$$

де

Δ_{Mtpl} - переміщення точки C^d відносно точки C від кручення зовнішнім моментом M_t з врахуванням нелінійних деформацій;

Δ_{Qpl} - переміщення C^d відносно C від кручення нагельною силою Q з врахуванням нелінійних деформацій;

Δ_{smpl} - переміщення C^d відносно C від зминання бетону нагельною силою Q з врахуванням нелінійних деформацій.

Алгоритм розрахунку:

1. Визначаємо нагельну силу Q з пружного (без врахування нелінійних властивостей бетону) розрахунку за методикою розділу 2;
2. По МСЕ розраховуємо $\Delta = \Delta_{Mtpl} - \Delta_{Qpl}$ переміщення в місті розташування тріщини;
3. Визначаємо переміщення Δ_{smpl} від дії нагельної сили Q ;
4. Якщо $\Delta_{Cpl} < 0$, то нагельну силу Q зменшуємо на певну величину (яка задається на початку розрахунку, наприклад, 10% від Q);
5. Якщо $\Delta_{Cpl} > 0$, то нагельну силу Q навпаки збільшуємо на певну величину;

6. Розрахунок повторюється до тих пір, поки умова рівняння (7) не буде задовільнена з заданою наперед точністю;

7. Визначаємо переміщення Δ_{smpI} від дії знайденою ітераціями за п. 2-6 нагельної сили Q .

8. Знаходимо повне переміщення у тріщині a_{totpl} :

$$a_{totpl} = 2 \cdot \Delta_{smpI} \cdot Q \quad (8)$$

9. Визначивши a_{totpl} , визначаємо коефіцієнт k_{rpl} :

$$k_{rpl} = \frac{a_{totpl} + a_e}{a_e} \quad (9)$$

де

a_e - переміщення від кручення елемента без тріщин.

На рис. 15, як приклад, показаний графік нелінійного розрахунку побудований теоретично та отриманий експериментальним шляхом.

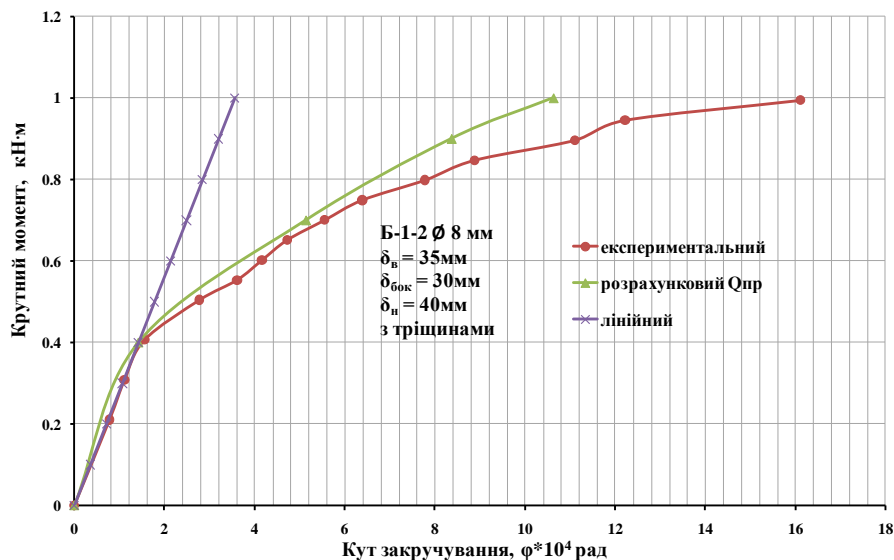


Рис. 15. Залежність „крутий момент-кут закручування” з урахуванням нелінійних деформацій бетону.

Коефіцієнт варіації величини похибки при визначенні переміщень розрахованих теоретично та отриманих експериментальним шляхом не перевищує 18,9 %.

В четвертому розділі також пропонується інженерна методика розрахунку на міцність залізобетонних елементів коробчастого перерізу з нормальними тріщинами за дії крутного моменту.

Розглянемо схему зусиль, діючих в поперечному перерізі коробчастого елемента з нормальною тріщиною (рис. 16).

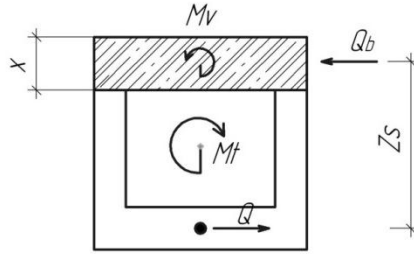


Рис. 16. Зусилля в нормальному перерізі з тріщиною

Умова рівноваги відносно горизонтальної вісі (в напрямку Q):

$$Q_b = Q \quad (10)$$

Момент цієї пари сил дорівнює:

$$M_Q = Q \cdot Z_s \quad (11)$$

Умова рівноваги (кручення відносно поздовжньої вісі елемента):

$$M_v = M_t - M_Q \quad (12)$$

M_v - частина зовнішнього крутного моменту, що сприймається зоною без тріщин.

Q - знайдемо через величину Δ_{Mt} - переміщення блока A відносно блока B за дії крутного моменту M_t , яке знаходиться через величину φ_{tot} - повний кут повороту між блоками A і B

$$\varphi_{tot} = \varphi_{Mt} - \varphi_s - \varphi_m \quad (13)$$

де

φ_{tot} - повний кут повороту між блоком A та блоком B (див. рис. 2);

φ_{Mt} - повний кут повороту від дії зовнішнього моменту M_t ;

φ_s - повний кут повороту від дії вертикальних погонних зусиль $S_i(y)$;

φ_m - повний кут повороту від дії погонних поперечних згинальних моментів $m_i(y)$.

Повний кут повороту від дії зовнішнього моменту M_t

$$\varphi_{Mt} = \frac{M_t \cdot l_k}{GJ} \quad (14)$$

Повний кут повороту від дії вертикальних погонних зусиль $S_i(y)$

$$\varphi_s = \sum N_i \cdot b \cdot y_i + 2 \cdot N_2 \cdot b \cdot y_2 + \dots + 2 \cdot N_k \cdot b \cdot y_k \cdot \frac{1}{GJ} \quad (15)$$

де

b - половина ширини зони без тріщин (рис. 17);

y_i - найкоротша відстань від дії N_i до умовного перерізу зони без тріщин (рис. 17);

N_i - середнє значення погонних зусиль S_i , S_{i-1} які діють на ділянці Δ (рис. 18).

В свою чергу погонні зусилля N_i зв'язані з S_i наступною залежністю (рис. 18):

$$N_i = \Delta \cdot \frac{S_i + S_{i-1}}{2} \quad (16)$$

Довжина y_i зв'язана з l_k - наступною залежністю (рис. 18):

$$y_i = l_k - \left(\Delta \cdot (i-1) + \frac{\Delta}{2} \right) \quad \text{де} \quad \Delta = \frac{l_k}{k} \quad \text{тоді} \quad (17)$$

$$\varphi_s = \sum_{i=1}^k \frac{2 \cdot N_i \cdot b \cdot y_i}{GJ} \quad (18)$$

Аналогічно отримуємо формулу для φ_m - повного кута повороту від дії погонних поперечних згинальних моментів m_i

$$\varphi_m = \sum_{i=1}^k \frac{2 \cdot m_i \cdot \Delta \cdot y_i}{GJ} \quad (19)$$

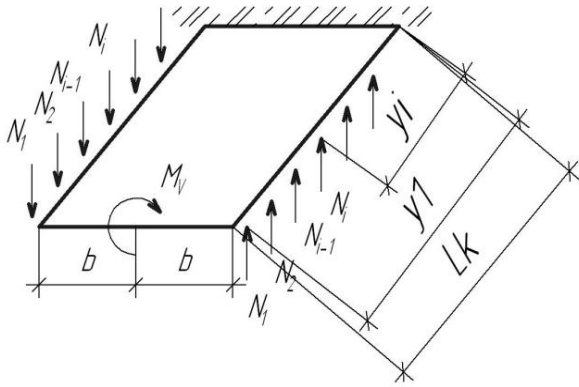


Рис. 17. Погонні зусилля N_i , які виникають від моменту M_v

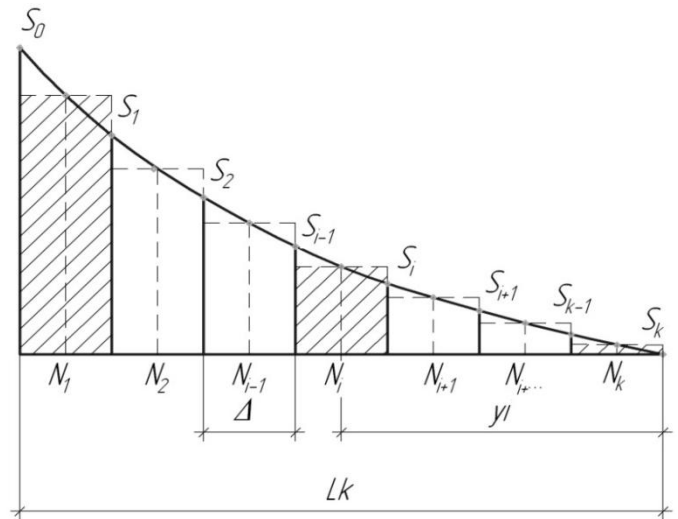


Рис. 18. Еюра погонних зусиль $S_0 \dots S_k$

Зазначена вище величина Δ_{Mt} зв'язана із φ_{tot} наступною геометричною залежністю:

$$\Delta_{Mt} = 2 \cdot \varphi_{tot} \cdot Z_s \quad (20)$$

Переміщення від дії одиничної нагельної сили Δ_{Qed} знайдемо за наступною залежністю:

$$\Delta_{Qed} = \Delta_{Mt} \cdot \frac{Z_s}{M_t} \cdot Q_{ed} \quad (21)$$

Враховуючи, що $Q = 1$ величину Δ_{smed} визначимо за формулою:

$$\Delta_{smed} = \varphi_{cc} \left(1000 \frac{1}{d_s^3 E_{cm}^2} + \frac{1}{d_s E_{cm}} \right) \quad \text{тоді} \quad (22)$$

$$Q = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta_{Mt}}{\Delta_{Q,ed} + 2 \cdot \Delta_{smed}} \right) \quad (23)$$

Визначивши нагельну силу Q , через M_Q по (12) знаходимо величину M_V .

Задавши значення M_V в програмному комплексі «Mathcad» знаходимо максимальне пагонне зусилля S_{\max} від сил S_i які виникають від моменту M_V в зоні без тріщин.

Визначимо максимальне напруження за наступною залежністю:

$$\sigma_{\max} = \frac{S_{\max}}{\delta} \quad \sigma_{\max} \leq f_{ctd} \quad (24)$$

де δ – ширина бокової плити (пластини) .

Коефіцієнт варіації величини похибки при визначенні міцнісних характеристик, розрахованих теоретично, та отриманих експериментальним шляхом не перевищує 7,6%.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертації вирішено задачу визначення жорсткості та міцності при крученні залізобетонних елементів коробчастого перерізу з нормальними тріщинами. На основі досліджень зроблені наступні висновки:

1. При виникненні нормальних тріщин змінюється як згинальна, так і жорсткість на кручення коробчастих залізобетонних елементів.

2. Розроблена чисельно-аналітична методика визначення жорсткості на кручення залізобетонних елементів коробчастого перерізу з нормальними тріщинами.

3. Розроблена чисельна методика визначення НДС залізобетонних елементів коробчастого перерізу з нормальними тріщинами з урахуванням нелінійних властивостей бетону. Проведені теоретичні розрахунки з достатньою точністю співпадають з експериментальними даними. Коефіцієнт варіації величини похибки при визначенні переміщень не перевищує 18,9 %.

4. Розроблена інженерна методика визначення внутрішніх зусиль в елементах коробчастого перерізу, в яких крутий момент прикладений до верхньої полиці. Методика передбачає стрижньову апроксимацію. Перевагою такої апроксимації є можливість врахування впливу тріщиноутворення на поверхнях розглядуваних пластин без застосування програмних комплексів.

5. Розроблена та запропонована інженерна методика розрахунку міцності коробчастих елементів з нормальними тріщинами, що дозволяє розраховувати залізобетонні елементи зазначеного перерізу без застосування програмних комплексів. Коефіцієнт варіації величини похибки при визначенні міцності не перевищує 7,6 %.

6. Порівняння результатів отриманих експериментально та проведених теоретично, свідчать про достовірність розробленої методики, що в свою чергу дало змогу розробити комп'ютерну програму для визначення жорсткісних та міцнісних характеристик коробчастих елементів з нормальними тріщинами.

7. Чисельними розрахунками встановлено, що при збільшенні діаметра поздовжньої арматури та висоти зони без тріщин, жорсткість елемента з нормальною тріщиною наближається до жорсткості елемента без тріщин.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ

1. Азизов, Т. Н. НДС и прочность железобетонных балок с нормальными трещинами при кручении : матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Динаміка та міцність машин, будівель та споруд» / Т. Н. Азизов, А. В. Мельник // Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Серія «Галузеве машинобудування, будівництво». – Полтава, 2009 – Вип. 3 (25). Т. 3. – С. 9-13.

2. Азизов, Т. Н. Розрахунок залізобетонних коробчастих балок при крученні / Т. Н. Азизов, О. В. Мельник, О. С. Мельник // Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : збірник наукових праць. – Рівне, 2010. – Вип. 20 – С.120-124.

3. Азизов, Т. Н. К расчету железобетонных элементов полого сечения с нормальными трещинами при кручении : матеріали міжнародної науково-технічної конференції "Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика" / Т. Н. Азизов, А. В. Мельник, А. С. Мельник // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010 – Вип. 33. – С. 10-14.

4. Азизов, Т. Н. Експериментальні дослідження жорсткості та міцності залізобетонних елементів коробчастого перерізу з нормальними тріщинами при крученні / Т. Н. Азизов, О. В. Мельник // Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : збірник наукових праць. – Рівне, 2011. – Вип. 21. – С. 82-86.

5. Азизов, Т. Н. НДС залізобетонних коробчастих балок з нормальними тріщинами при крученні з врахуванням нелінійності / Т. Н. Азизов, О. В. Мельник, О. Я. Червинський // Будівельні конструкції, будівель та споруд: проектування, виготовлення, реконструкція та обслуговування : збірник наукових праць – Макіївка, 2011 – Вип. 4 (90). – С. 18-23.

6. Азизов, Т. Н. Інженерний метод визначення НДС залізобетонних балок порожнистого перерізу з нормальними тріщинами / Т. Н. Азизов, О. В. Мельник, О. С. Мельник // Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : збірник наукових праць . – Рівне , 2011. – Вип. 22. – С. 154-161.

В спільних роботах [1-6] здобувачем виконана графічна частина та проведені чисельно-аналітичні розрахунки щодо визначення жорсткості на кручення в елементах коробчастого перерізу з нормальними тріщинами; розроблена методика проведення експерименту щодо визначення жорсткості та міцності залізобетонних фізичних моделей коробчастого перерізу з нормальними тріщинами, підготовлена та проведена експериментальна частина дисертаційного дослідження, проведена статистична обробка та аналіз

результатів експерименту; проведені чисельні розрахунки визначення жорсткості на кручення в елементах зазначеного перерізу з врахуванням нелінійних властивостей бетону; участь у розробці інженерних методик визначення жорсткості та міцності залізобетонних елементів коробчастого перерізу з нормальними тріщинами при крученні.

АНОТАЦІЯ

Мельник О.В. Крутильна жорсткість та міцність залізобетонних елементів коробчастого перерізу з нормальними тріщинами. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди. – Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса, 2012.

Дисертаційна робота спрямована на розвиток та удосконалення методики визначення жорсткості на кручення залізобетонних елементів з нормальними тріщинами на елементи коробчастого перерізу, розроблення інженерної методики розрахунку їх жорсткості та міцності, що дозволять уточнити величини внутрішніх зусиль, а також оцінити їх міцність.

Запропоновано інженерні методики визначення жорсткості та міцності залізобетонних елементів коробчастого перерізу з нормальними тріщинами на кручення.

Достовірність даних, отриманих за запропонованою чисельно-аналітичною методикою, підтверджена даними чисельних досліджень з використанням МСЕ, а також експериментальними даними, що дозволило створити комп'ютерну програму в програмному комплексі «Mathcad» для визначення параметрів жорсткості та міцності залізобетонних елементів коробчастого перерізу з нормальними тріщинами. Програма може бути використана в практичних інженерних розрахунках.

На експериментальних зразках коробчастого перерізу, що мали штучні нормальні тріщини та зазнавали впливу крутного моменту, досліджено вплив висоти зони без тріщин та діаметру поздовжньої арматури на їхній характер роботи, деформування та руйнування.

Ключові слова: залізобетонні елементи, коробчастий переріз, жорсткість на кручення, нормальні тріщини, напружено-деформований стан; стиснута зона, зона без тріщин, залежність «крутний момент-кут закручування», чисельно-аналітична методика, чисельні дослідження з використанням МСЕ.

АННОТАЦИЯ

Мельник А.В. Крутильная жесткость и прочность железобетонных элементов коробчатого сечения с нормальными трещинами. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 - строительные конструкции, здания и сооружения. -

Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса, 2012.

Диссертационная работа направлена на развитие и совершенствование методики определения жесткости на кручение железобетонных элементов с нормальными трещинами на элементы коробчатого сечения, разработка инженерной методики расчета их жесткости и прочности, которые позволят уточнить величины внутренних усилий, а также оценить их прочность.

Во **введении** обоснованы актуальность, научная новизна, практическое значение; представлена апробация результатов и дана общая характеристика диссертационной работы.

В **первом разделе** диссертации приводится обзор известных теоретических и экспериментальных исследований по жесткости и прочности железобетонных элементов на кручение, указано, что пространственная работа железобетонных перекрытий, мостов и других статически неопределимых конструкций значительно влияет на их напряженно-деформированное состояние. В свою очередь на перераспределение усилий между отдельными элементами таких систем оказывают влияние как изгибная жесткость, так и жесткость на кручение.

Определению прочности и деформативности железобетонных балок при изгибе посвящено много научных работ. В то же время исследованию напряженно-деформированного состояния элементов при кручении уделено недостаточно внимания и в основном работы посвящены элементам с пространственными спиральными трещинами. Методика определения напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов с нормальными трещинами находится на начальном этапе своего развития и касается элементов прямоугольного и таврового сечения.

Особенно много вопросов возникает при расчете элементов с полым сечением. Поэтому, совершенствование методики их расчета при действии кручения является актуальной задачей, решение которой позволит получить экономический эффект с одновременным повышением надежности конструкций.

Во **втором разделе** предложена численно-аналитическая методика определения жесткости на кручение железобетонных элементов коробчатого сечения с нормальными трещинами без учета и с учетом трещинообразования, что является развитием методики для элементов прямоугольного и таврового сечения. Также показана методика численных исследований по МКЭ жесткости железобетонных элементов коробчатого сечения с нормальными трещинами.

В железобетонном элементе с нормальными трещинами внешний крутящий момент передается с блока на блок, отделенных нормальной трещиной, через нетреснувший участок – зону без трещин. Решить задачу о нахождении деформативных характеристик такого элемента общепринятыми методами теории упругости невозможно.

Для определения жесткости коробчатого элемента с нормальными трещинами необходимо определить перемещение в трещине одного блока относительно другого. На эти перемещения (вертикальные, поперечные, продольные и углы поворота) оказывают влияние внутренние усилия, возникающие вследствие действия внешнего крутящего момента, приложенного лишь к части поперечного сечения (зону без трещин); возникающие вследствие действия внутреннего момента, вызванного нагельной силой в продольной арматуре. Деформации в трещине будут также зависеть от смятия бетона и сдвига арматуры.

Жесткость элемента с трещиной определяется как отношение жесткости упругого (сплошного элемента без трещин) на коэффициент k_r , который представляет собой отношение деформативности элемента с нормальной трещиной к деформативности элемента без трещин.

В **третьем разделе** диссертации изложены методика проведения и результаты экспериментального исследования железобетонных образцов коробчатого сечения с нормальными трещинами на предмет определения их крутильной жесткости и прочности. Образцы отличались разной длиной трещины, которая имитировала разную высоту зоны без трещин и различным диаметром продольной арматуры.

Искусственные нормальные трещины разделяли образцы по длине на отдельные блоки, связанные между собой только через сплошную зону сечения и продольную арматуру. Железобетонные элементы коробчатого сечения с нормальными трещинами, которые подвергались деформации кручения, имели график зависимости «крутящий момент-угол закручивания» криволинейной формы, подтверждающий упруго-пластический характер деформирования образцов. Пластические деформации появлялись на этапах (50-60%) нагрузки от максимального разрушительного момента образца. С увеличением толщины верхней полки и боковых стенок коробчатого поперечного сечения, а также диаметра арматуры деформирование образцов с нормальными трещинами, армированных только продольной арматурой, приближается к упругому.

Основной вид разрушения - это разрушение верхней зоны без трещин от действия растягивающих напряжений по наклонным площадкам. Эти напряжения возникают в результате действия крутящего момента, который воспринимает непосредственно верхняя полка образца.

В **четвертом разделе** предложена методика определения жесткости на кручение с учетом нелинейных деформаций и инженерная методика определения прочности на кручение железобетонных элементов коробчатого сечения с нормальными трещинами.

При определении жесткости на кручение коробчатых элементов с нормальными трещинами с учетом нелинейных деформаций нагельная сила, возникающая в продольной арматуре, определялась из условия совместности перемещений в месте условного рассечения арматуры. Эти перемещения

определялись по методу конечных элементов (МКЭ) с применением программного комплекса «Ли́ра» с учетом нелинейных свойств.

Прочность железобетонных элементов коробчатого сечения с нормальными трещинами при действии крутящего момента определялась из условия равновесия (кручения относительно продольной оси элемента), которое заключалось в определении части внешнего крутящего момента, что воспринималось зоной без трещин. Критерием разрушения было сравнение величины момента M_v в верхней полке элемента, которое определялось по предложенной методике, с максимальным крутящим моментом $[M_v]$ для эквивалентного прямоугольного сечения посчитанного по известным формулам сопротивления материалов.

Ключевые слова: железобетонные элементы, коробчатое сечение, жесткость на кручение, нормальные трещины, напряженно-деформированное состояние; сжатая зона, зона без трещин бетона, зависимость «крутящий момент-угол закручивания», численно-аналитическая методика, численные исследования с использованием МКЭ.

ABSTRACT

Melnik O.V. Torque rigidity and strength of reinforced concrete box-section elements of the normal fissures. - Manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.23.01 - building construction, building and construction. - Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odessa, 2012.

The thesis aims at developing and improving the methodology for determining the stiffness in torsion of reinforced concrete elements with cracks normal to the box-section elements, development of engineering methods of calculating their rigidity and strength that will clarify the value of internal efforts and assess their strength.

Proposed engineering methodology for determining hardness and strength of reinforced concrete box section elements with normal cracks in torsion.

Reliability of data obtained by the proposed numerical-analytical techniques, confirmed by numerous studies using the ITU, as well as experimental data, allowing a computer program in the software complex «Mathcad» to determine the parameters of stiffness and strength of reinforced concrete box-section elements of the normal fissures. The program can be used in practical engineering calculations.

In the experimental box-section beams, which were normal artificial cracks and exposed to torque, The influence of altitude zone without cracks concrete and rebar diameter longitudinal nature of the work of deformation and fracture patterns.

Keywords: concrete elements, box-section stiffness in torsion, normal cracks, deformation, compressed zone, a zone free of cracks of concrete, the dependence of «torque-angle tightening» numerical-analytical methods, numerical studies using the ITU.

Підписано до друку 30.03.2012. Формат 60х90 1/32
Папір офсет.
Обл.-вид. арк. . Ум. друк. арк. 0,9.
Тираж 100. Зам. № 2023

**Віддруковано з оригінал-макета
ПП Жовтий О.О.**

20300, м. Умань, вул. Садова, 28
(УДПУ, навчальний корпус № 3, кімн. 112, 327, 328))
Тел. 8 067 77 30 197
8 097 9 467 467

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготівників
і розповсюджувачів видавничої продукції
Серія ДК, № 2444 від 22.03.2006 р.

Віддруковано на цифровому дублюєаторі Ricoh