

УДК 004.942:624.016

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СТИСНУТОГО ТРУБОБЕТОННОГО ЕЛЕМЕНТУ З ЯДРАМИ ІЗ ВИСОКОМЦНОГО БЕТОНУ

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СЖАТОГО ТРУБОБЕТОННОГО ЭЛЕМЕНТА С ЯДРАМИ ИЗ ВИСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА

NUMERICAL MODELLING OF THE BEHAVIOR OF COMPRESSED CONCRETE FILLED STEEL TUBE ELEMENT WITH CORES FROM HIGH-STRENGTH CONCRETE

Єрмоленко Д.А., д.т.н., проф., Гасенко А.В., к.т.н., доц., Демченко О.В., ст. викл. (Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, м. Полтава)

Ермоленко Д.А., д.т.н., проф., Гасенко А.В., к.т.н., доц., Демченко О.В., ст. преп. (Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка, г. Полтава)

Yermolenko D.A, doctor of technical science, professor, Gasenko A. V., candidate of technical sciences, associate professor, Demchenko O.V., senior teacher (Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University)

Наведено опис створення скінченно-елементної моделі стиснутого труобетонного елемента, опцій нелінійного статичного аналізу. Наведено можливий шлях оптимізації моделі. Проведено порівняння результатів чисельного моделювання роботи стиснутих труобетонних елементів із даними власних експериментальних досліджень.

Приведено описание создания конечно-элементной модели сжатого труобетонного элемента и опций нелинейного статического анализа. Наведено возможный путь оптимизации модели. Проведено сравнение результатов численного моделирования работы сжатых труобетонных элементов с данными собственных экспериментальных исследований.

A description of creation of finite element model of compressed complex element and options for non-linear static analysis is given. A possible way for model optimization is described. Numerical modeling results of the behavior

of compressed concrete filled steel tube elements are compared with own experimental researchers data.

Ключові слова:

Моделювання, скінченні елементи, високоміцний бетон, труботетон.
Моделирование, конечные элементы, высокопрочный бетон, труботетон.
Modeling, finite elements, high-strength concrete, concrete filled steel tube.

Вступ. Сучасне будівництво характерне тим, що збільшуються висоти будівель і прольоти перекриттів, зростають кранові навантаження та збільшується вага технологічного обладнання. Все це вимагає використання конструктивних елементів, які б мали винятково високу несучу здатність при малих поперечних перерізах. Цим вимогам повністю відповідають труботетонні стрижні, які являють собою сталеві труби, заповнені бетоном.

Причиною ефективності труботетонних конструкцій є цілий ряд позитивних якостей, якими володіють дані конструкції. Їх зовнішня сталева оболонка, одночасно виступаючи в ролі поздовжнього і поперечного армування. Крім того, сталева труба, заповнена бетоном, захищає від втрати як місцевої, так і загальної стійкості.

Проведено велика кількість експериментальних досліджень труботетонних конструкцій. На основі цих досліджень побудовано ряд теорій розрахунку. Але розмаїття геометричних та фізичних параметрів робить ці теорії частковими [1]. Для розробки загальної теорії роботи труботетону під навантаженням потрібні глибокі дослідження напружено-деформованого стану. Застосування аналітичних методів можливе лише для окремих часткових випадків. Виходом до такого аналізу можуть бути чисельні методи дослідження напружено-деформованого стану, наприклад, методом кінцевих елементів. Адекватність його застосування може бути перевірена шляхом порівняння з результатами експериментальних досліджень.

Аналіз останніх досліджень. Світовий досвід показує, що при застосуванні труботетону вага споруди зменшується в 2-3 рази, витрати праці в 4-5 разів, вартість у 2-3 рази порівняно із залізобетонними. Порівняно з металевими конструкціями досягається зниження вартості до 40% при зменшенні витрат сталі в 2-3 рази [1].

На даний час Україні і за кордоном спостерігається збільшення будівництва висотних будівель. В таких складних об'єктах найвигідніше використовувати високоміцні бетони, які дозволили б істотно зменшити розміри перерізу несучих конструкцій, і, відповідно, матеріальні витрати на будівництво. Високоміцні бетони, при досягненні граничного стану, руйнуються крихо, що знижує їх надійність. Цей недолік виключається при застосуванні труби-оболонки. Сталева оболонка стримує крихке руйнування бетонного ядра, забезпечуючи пластичний характер руйнування конструкцій [2].

Вітчизняними і зарубіжними вченими виконані значні дослідження в області вивчення властивостей трубобетону. Дослідники відзначають визначальний вплив на міцність трубобетонних елементів масштабного фактора, відсотка армування, міцності сталі і бетону. Однак застосування бетонів класів понад С32/40 в нашій країні не достатньо вивчено [3]. Доцільність застосування високоміцних бетонів підтверджено закордонним досвідом проектування трубобетону [4–5].

Процедура оцінки напружено-деформованого стану методом кінцевих елементів складається з декількох формалізованих етапів [6–7]. Найбільш відповідальним є етап створення адекватної кінцево-елементної моделі трубобетону. Необхідно забезпечити об'єднання для сумісної роботи двох таких різних за механічними властивостями видів будівельних матеріалів – сталевий прокат та високоміцний бетон [8].

Постановка мети і задач досліджень. Метою досліджень є розроблення скінченно-елементної моделі трубобетонних елементів з ядрами із високоміцних бетонів для виявлення особливостей їх роботи під стискаючих навантажень. Дослідження проводилися чисельним моделюванням за допомогою програмного комплексу, який реалізує алгоритм методу кінцевих елементів.

Викладена мета досліджень розв'язувалася поетапним вирішенням наступних задач досліджень: обґрунтувати вибрану методику (програмний комплекс) проведення чисельного дослідження та прийняті припущення; розробити поетапну схему створення скінченно-елементної моделі центрально-стиснутих трубобетонних елементів; розглянути особливості врахування в чисельному розрахунку діаграм роботи вихідних матеріалів (сталі і бетону); оцінити адекватність запропонованої моделі шляхом порівняння із результатами випробовувань лабораторних зразків.

Передумови досліджень. Комп'ютерне моделювання за допомогою пакетів комерційних програм (ANSYS, NASTRAN, SCAD, Cosmos, ASKA, ЛИРА, МОНОМАХ і ін.) призначене для чисельного дослідження на ЕОМ напружено-деформованого стану та несучої здатності конструкцій в цілому і їх елементів, а також виявлення небезпечних місць концентрації напружень.

У даній роботі чисельне моделювання напружено-деформованого стану дослідних зразків було виконано в системі NASTRAN Femap 10.1.1 SC 32bit. Цей програмний продукт реалізує широкий спектр інженерних розрахунків (статичних задач, динамічних процесів, задач нелінійної поведінки конструкції тощо). Достовірність результатів розрахунку з допомогою MSC/NASTRAN підтверджена використанням її в промисловості більш ніж 35 років [9].

Водночас із прагненням досягти найвищої збіжності результатів чисельного моделювання та експериментальних досліджень зразків, під час моделювання доводиться вводити деякі припущення, зокрема неврахування власної ваги досліджуваних конструкцій; введення фізико-механічних

характеристик сталі та бетону як повністю однорідних та ізотропних; незначного коригування діаграм деформування сталі та бетону, що обумовлено обмеженнями використаного програмного комплексу.

Методика досліджень. Створення скінченно-елементної моделі для визначення напружено-деформованого стану моделей зразків та її аналіз виконувались в наступному порядку.

1. *Створення геометрії моделі.* Спочатку створювався плоский поперечний переріз досліджуваного трубобетонного елемента за допомогою кіл із внутрішнім та зовнішнім діаметрами використаної труби ($\text{Ø}159 \times 3,5$ мм; $\text{Ø}159 \times 4$ мм або $\text{Ø}159 \times 6$ мм), що задавалися координатами центра кола (початок координат) та радіуса кола. Об'ємна модель труби та бетону конструкції формувалася шляхом видовження утворених завчасно по заданих прямих плоских граничних поверхонь на висоту моделі, рівну $h = 4 \times d \approx 640$ мм.

2. *Введення властивостей матеріалів.* Під час моделювання конструкцій передбачалося, що вони будуть працювати у пружно-пластичній стадії. Тому при задаванні характеристик матеріалів було враховано криволінійну залежність між навантаженням-деформаціями у вигляді функції (Function Dependence). Із фізико-механічних характеристик матеріалів було задано початковий модуль пружності (Young's Modulus), коефіцієнт Пуассона (Poisson's Ratio), а також напруження на межі текучості (Initial Yield Stress). Із запропонованих типів нелінійності матеріалу (Nonlinear Type), що враховувався за заданою межею текучості був вибраний «пластичний матеріал» (Plastic).

3. *Вибір типу скінченних елементів (CE) та розбиття моделі на CE.* Створена об'ємна модель “заповнювалася” скінченними елементами. За результатами аналізу для створення об'ємної скінченно-елементної сітки зразків було прийнято використовувати трьохвимірні об'ємні елементи типу solid у формі гексаєдрів Hex Mesh. Розмір сторони елемента приймався 10 мм, що складає близько 1,5% від максимального розміру моделі (висоти).

4. *Задавання граничних умов (ступенів вільності) – в'язей,* що прикладаються до конструкції. До зразків прикладались розподілені по площині граничні умови: для нижнього горизонтального обрізу моделі трубобетонного елемента заборонялися всі три поступальні та кутові переміщення навколо поздовжньої вісі елемента; для верхнього обрізу – поступальні переміщення у горизонтальній площині та кутові переміщення навколо поздовжньої вісі елемента.

5. *Формування системи навантажень.* З метою переміщень на однакову величину по вертикальній поздовжній осі верхньої площини зразка (відсутності місцевих деформацій під навантаженням), навантаження передавалося через жорсткі елементи типу Rigid до умовної точки прикладення зосередженої сили, створюючи ефект рівномірно розподіленого

навантаження по верхній площині зразка. Модель трубобетонного елемента, підготовлена до розрахунку, показана на рисунку 1.

6. Вибір типу скінченно-елементного аналізу. Під час проведення чисельного моделювання елементів будівельних конструкцій, були використані декілька типів скінченно-елементного аналізу:

А. Лінійний статичний аналіз (Nastran Static Analysis Set);

В. Нелінійний статичний аналіз (Nastran NL Static Analysis Set).

7. Розрахунок конструкції – скінченно-елементний аналіз. Число ступенів навантаження від початку завантаження до значення максимально прикладеного (кількість природжень навантаження) задавалося на закладках варіанти контролю (Control Options) та додаткові опції (Advanced Options) опції нелінійного розрахунку – 500 з включенням опції показу всіх результатів на проміжних ступенях. Число ітерацій на кожній ступені навантаження ставилося за замовчуванням (автоматично), але не менше ніж 5 (мінімальне значення – Iterations Before Update). Основним принципом розрахунку було згладжування діаграм навантаження-деформації вихідних матеріалів – так званий «Обхід по кривій» (Arc-Length Method). Метод розрахунку обраний за замовчуванням. Точність вихідних даних розрахунку теж залишена за замовчуванням: для навантажень, деформацій та напружень – 0,001. Вихідними параметрами розрахунку, що доступні для перегляду після проведення розрахунку, виставлялося формування бази даних про внутрішні зусилля, деформації на напруження. Під час проведення скінченно-елементного аналізу моделей проводився поточний контроль ходу нелінійного розрахунку, а саме етапи роботи моделі: ділянки пружності, пропорційності текучості, зміцнення тощо (рис. 2).

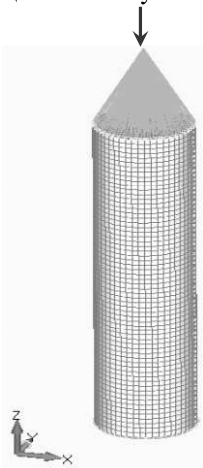


Рис. 1. Схема завантаження та закріплення моделі

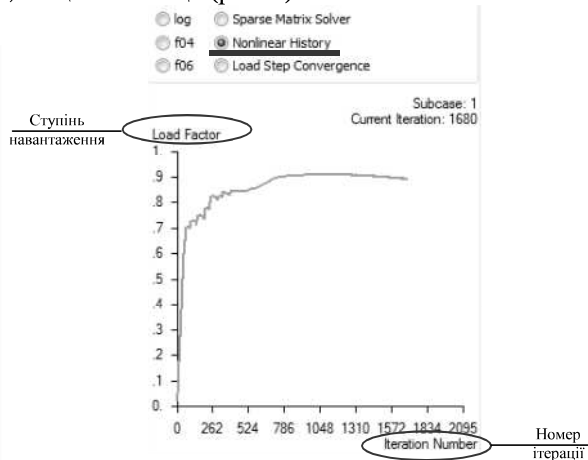


Рис. 2. Поточний контроль ходу нелінійного розрахунку

Оптимізація розрахункової моделі. Для підвищення ефективності проведення скінченно-елементних розрахунків – зменшення числа СЕ, що прямо пропорційно зменшує необхідні ресурси ПК на проведення розрахунку, а також час розрахунку – вважається можливим оптимізація скінченно-елементної розрахункової моделі шляхом зменшення її розмірів. Базуючись на припущенні, що геометрія та граничні умови розглядуваної моделі симетричні відносно центральних вертикальних площин XOZ та YOZ , а також відносно горизонтальної площини XOY , що проходить посередині висоти зразка, було вирізано для подальшого аналізу 1/4 частину моделі. На рисунку 3 показана розрахункова схема 1/4 частини моделі (а) та скінченно-елементна модель, підготовлена до розрахунку (б).

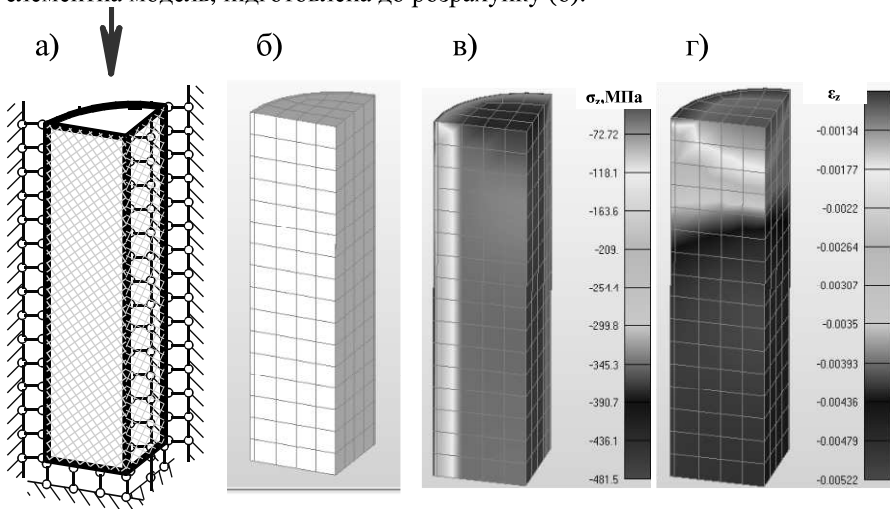


Рис. 3. Представлення 1/4 моделі зразка та результатів розрахунку:
а) – задавання граничних умов; б) – скінченно-елементна модель; в) – розподіл нормальних напруження σ_z , МПа; г) – розподіл поздовжніх деформацій ϵ_z

За результат чисельного розрахунку 1/4 частину моделі отримано: розподіл нормальних напружень (а) σ_z (МПа); розподіл поздовжніх деформацій (б) ϵ_z по поверхні 1/4 моделі. Порівнюючи результати розрахунку 1/4 частину моделі та повної моделі, просліджується цілком добра збіжність отриманих даних про напруження та деформації.

Результати досліджень. Проведення розрахунку методом скінченних елементів за допомогою ЕОМ дозволили отримані графіки розподілу відносно головних осей деформацій і напружень на поверхні сталевій труби-оболонки, бетонного ядра, а також в будь-якому перерізу дослідних зразків. Та порівняти їх числові значення із результатами власних експериментальних досліджень.

Діаграми роботи бетонів задавалися за даними, отриманими під час лабораторних випробувань бетонних циліндрів діаметром $\varnothing 100$ мм та висотою $h = 4 \times d = 400$ мм. На рисунку 4а показані використані діаграми деформування $\sigma_b - \varepsilon_b$ для важкого високоміцного класу C50/60. На рисунку 4б показано графіки порівняння деформацій, отриманих під час експериментальних випробувань бетонних циліндрів, та деформацій, виписаних після моделювання таких же циліндрів у програмному комплексі. Максимальна розбіжність даних близька 7,2%.

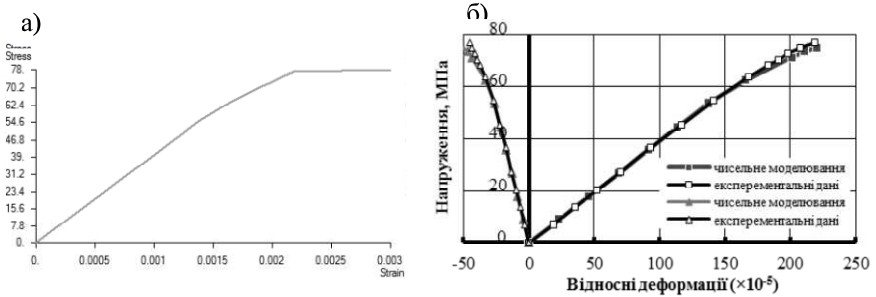


Рис. 4. Діаграма роботи бетону класу C50/60: а) – за результатами випробування циліндрів; б) – порівняння результатів чисельного моделювання із експериментальними даними

На рисунку 5 наведені графіки зміни поздовжніх та поперечних деформацій від навантаження, які отримані натурними випробування дослідних зразків та за результатами проведеного чисельного моделювання. Відхилення теоретичних та експериментальних значень деформацій в не перевищує 5 %.

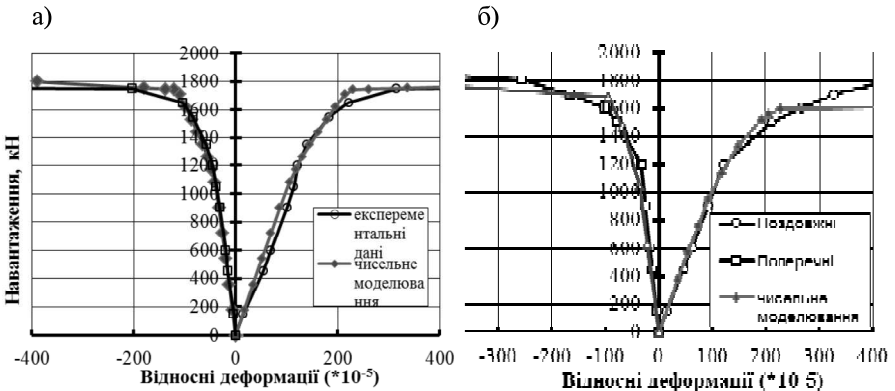


Рис. 5. Порівняння результатів чисельного моделювання із експериментальними дослідженнями: а) – зразки серії ТБ-1-5; б) – зразки серії ТБ-2-3

Зразки серії ТБ-1-5 виконано із труб $\varnothing 159 \times 3,5$ мм із $R_y = 256$ МПа та заповнені бетоном С60/75. Зразки серії ТБ-2-3 виконано із труб $\varnothing 159 \times 4,0$ мм із $R_y = 347$ МПа та заповнені бетоном С40/50. Слід констатувати, що до величини зовнішнього зусилля у 0,85-0,95 від зусилля N_1 відповідні діаграми повністю співпадають. Зусилля N_1 є несучою здатністю дослідних зразків і відповідає моменту появи текучості у сталі оболонки.

Висновки. Узгоджено алгоритм розрахунку НДС трубобетонних елементів з заповненням високоміцними бетонами методом скінченних елементів на ЕОМ. Прийняті розрахункові моделі елементів в програмному комплексі адекватні та відповідають тотожним лабораторно дослідженим конструкціям. Розмір SE, на які слід розбивати модель, варто приймати приблизно 1-1,5% від загальної висоти чи довжини досліджуваної моделі. При такій скінчено-елементній сітці значення нормальних напружень відрізняються від середнього значення порахованого по результатам всіх розрахунків до 4,3%. Необхідні ресурси ПК для створення і розрахунку такої моделі достатні і придатні для дослідження НДС модельованих конструкцій. Порівняні результати експериментальних та чисельних досліджень трубобетонних елементів колового перерізу: в основному отримані несуттєві розбіжності до 7%.

1. Стороженко Л.І. Трубобетон: Монографія / Л. І. Стороженко, Д. А. Єрмоленко, О. І. Лапенко. – Полтава: ПолтНТУ, 2009. – 306 с. 2. Стороженко Л.І. Особливості роботи високоміцних бетонів в трубобетонних конструкціях / Л. І. Стороженко, Д. А. Єрмоленко, О. В. Демченко // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. трудов. – Дніпропетровськ: ПГАСА, 2012. – Вип. 65. – С. 577 – 580. 3. Стороженко Л.І. Експериментальні дослідження високоміцних бетонів для ядер трубобетонних елементів / Л.І. Стороженко, Д.А. Єрмоленко, О.В. Демченко. // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Збірник наукових праць. – Вип. 27 – Рівне, 2013. С. 222 – 228. 4. Кузнецов А.С. Прочность трубобетонных колонн с предварительно обжатым ядром из высокопрочного бетон / А. С. Кузнецов // Дисс. канд. техн. наук, Магнитогорск, 2007. - 151 с. 5. Иссерс Ф.А. Прочностные и деформативные свойства высокопрочных бетонов с модификатором МБ 10-01 / Ф. А. Иссерс, М. Г. Булгакова, Н. И. Вершинина // Бетон и железобетон, №3, 1999. - С. 6 – 9. 6. Гореев В.В. Математическое моделирование при расчетах и исследованиях строительных конструкций / В.В. Гореев, В.В. Филиппов, Н.Ю. Тезиков. – М.: Высшая школа, 2002. – 206 с. 7. Зенкевич О.С. Метод конечных элементов в теории сооружений и в механике сплошной среды / О.С. Зенкевич, И. Чанг. – М.: Недра. – 1974. – 238 с. 8. Єрмоленко Д.А. Об'ємний напружено-деформований стану трубобетонних елементів: Монографія / Д. А. Єрмоленко – Полтава: Видавець Шевченко Р.В. –2012. – 316 с. 9. Рычков С.П. MSC visualNASTRAN для Windows / С.П. Рычков. – М.: НТ Пресс, 2004. – 552 с.