

УДК 624.042:624.072.1

## ЧИСЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЮВАННЯ ЗБІРНИХ ПЕРЕКРИТТІВ З УРАХУВАННЯМ НЕЛІНІЙНОСТІ

д.т.н. Банах В.А., к.т.н. Фостащенко О.М.

*Запорізька державна інженерна академія*

**Постановка проблеми.** Важливим напрямом вдосконалення каркаса є полегшення його елементів і вузлів сполучень за рахунок повнішого використання резервів міцності, деформативності матеріалів і ефективної роботи конструктивної схеми. Це може бути досягнуте застосуванням методів розрахунку будівель і споруд з урахуванням фізичної та конструктивної нелінійності, що реалізуються по методу скінченних елементів, в якому нелінійність деформації враховується ітерацією по заданих реальних діаграмах.

Характер зміни параметрів взаємодії збірних елементів представляється важливими для правильної побудови ітераційного процесу в розрахунках для врахування нелінійності деформації та робить істотний вплив на міцність і жорсткість, як самих елементів каркаса, так і усієї конструктивної системи в цілому.

Для отримання надійних результатів дуже актуальною є проблема розробки розрахункових моделей і практичних методик, що дозволяють розраховувати складні будівлі з максимальним урахуванням реальних властивостей матеріалів, конструкцій, їх сполучень і просторового характеру деформацій, формувати просторові розрахункові моделі для реалізації по методу скінченних елементів.

Особливу актуальність ця проблема набуває при реконструкції будівель з метою оцінки резервів несучої здатності, та перерозподілу зусиль, викликаних зміною характеру та величин зовнішніх дій і розрахункових схем.

**Зв'язок з науковими і практичними завданнями і аналіз останніх досліджень і публікацій.** Комп'ютерному моделюванню конструкцій різного ступеню складності, дослідженню сумісної роботи конструкцій при різних навантаженнях, врахуванню сумісної роботи конструкцій, дослідженню нелінійної роботи конструкцій присвячені роботи – О.С. Городецького [1], С.Ф. Клованича [3,4], О.В. Перельмутера [6], а також [5], у яких вичерпно викладена теорія методу та дано представлення його реалізації на ЕОМ.

Нині розроблена та використовується розвинена бібліотека скінченних елементів, що дозволяє представляти будь-який елемент конструкції відповідним типом скінченного елемента [5].

**Формулювання цілей.** Найбільш складними для чисельного моделювання конструкціями є збірні плити перекриття, моделювання яких навіть без урахування нелінійності ускладнене двома чинниками: складною формою поперечного перерізу таких елементів та їх конструктивною ортотропністю.

Оскільки в статті розглядаються залізобетонні перекриття, а залізобетон є композитним матеріалом із складними деформаційними характеристиками, то при проектуванні залізобетонних конструкцій перекриттів до розрахункових моделей пред'являються додаткові вимоги, які полягають в можливості врахування в них нелінійності деформації матеріалу, а також існуючих і прогнозованих тріщин. Важливою особливістю реальних матеріалів є нелінійний характер залежності між напруженням і деформацією. Врахування таких особливостей деформації матеріалів конструкцій в розрахунок дозволяє наблизити теоретичні прогнози до реальної їх поведінки.

**Виклад основного матеріалу досліджень.** У практиці проектування залізобетонних конструкцій прийнято розрізняти фізичну, геометричну та конструктивну нелінійності.

Для повного аналізу напружено-деформованого стану конструкції слід враховувати усі три види нелінійностей. Фізична нелінійність обумовлена врахуваннями в розрахунок нелінійної залежності між компонентами узагальненого напруження та деформацій, і характеризує роботу матеріалу конструкції в області пружнопластичності.

Для залізобетонних конструкцій фізична нелінійність викликається не пружними деформаціями матеріалів в елементах і вузлах їх сполучень, а також виникненням в них тріщин.

Величина фізичної нелінійності деформації матеріалів залежить від рівня і знаку напруження, що виникає в них. Для вузлів з'єднання збірних залізобетонних елементів характерний особливий вид фізичної нелінійності. Він полягає в тому, що омонолічені частини вузлів, за відсутності в них металевих зв'язків, чинять опір стискуванню, але не чинять опір розтягуванню. Це призводить до неоднакової деформативності таких вузлів при дії на них знакозмінних зусиль.

Аналітичними методами практично неможливо детально врахувати фізичну нелінійність деформації кожного елемента, оскільки неможливо підібрати монотонні функції, що в загальному випадку описують закон розподілу нелінійних деформацій по елементах. Тому в практичних методах розрахунку фізичну нелінійність деформації елементів і зв'язків зазвичай враховують введенням узагальнених коефіцієнтів, що коригують їх жорсткісні характеристики.

Чисельні методи, у тому числі МСЕ, дозволяють задавати деформаційні властивості окремих частин конструкції незалежно від інших елементів. Це дає можливість описувати нелінійність кожного елемента на основі його діаграми деформації. Рішення задачі при цьому зводиться до правильної організації ітераційного процесу з раціонально вибраною функцією залежності деформацій елемента від напруження. При цьому слід враховувати, що МСЕ передбачає постійність жорсткісних характеристик в межах скінченного елемента.

Під геометричною нелінійністю розуміють порушення лінійної залежності між навантаженням і переміщеннями, викликане виникненням додаткових зусиль при деформації конструкції або окремих її елементів. Тому розрахунки з урахуванням геометричної нелінійності часто називають розрахунками за деформованою схемою. При розрахунках по МСЕ в системах лінійних рівнянь на

кожному кроці ітерацій будуть змінюватимуться тільки навантаження, що додаються.

Розрахункові моделі, що використовують, повинні максимально детально та диференційовано враховувати жорсткісні характеристики збірних елементів, реальні властивості матеріалів, конструкцій та їх сполучень і просторовий характер деформацій, дозволяючи при цьому виконувати розрахунки з можливо меншою трудомісткістю та витратами машинного часу.

Для перевірки запропонованих положень були використані матеріали експериментальних досліджень багатопустотної плити ПК60-15-8AtV отриманих в Запорізькому відділенні Державного підприємства «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» [2].

Навантаження створювали бетонними блоками, середня маса яких – 1,5 кН. Розподіл навантаження виконаний рівномірно по площі плити.

Робоче армування поздовжньою арматурою 4Ø14A400C. Міцність бетону на стиск  $f_{ck, cube} = 25$  МПа, C20/25.

Вертикальні переміщення в середині прольоту (прогини) і на опорах вимірювалися прогиновимірювачем ПАО-6 з ціною ділення 0,01 мм.

Ширину розкриття тріщин вимірювали мікроскопом МПБ-2 з ціною ділення 0,05 мм.

Навантаження виконували етапами: 5 етапів до контрольного навантаження по перевірці жорсткості, далі 3 етапи - до контрольного навантаження по перевірці тріщиностійкості та далі 7 етапів до контрольного навантаження по перевірці міцності ( $q=13,27$  кН/м<sup>2</sup> ( $c=1,42$ )).

Схема завантаження плити контрольним навантаженням по жорсткості, міцності та тріщиностійкості приведена на рис. 1. Залежність прогину від рівня навантаження приведена на рис. 2.

Зроблено розрахункове обґрунтування експерименту в нелінійній постановці із застосуванням ПК «ЛІРА-САПР» (ліцензія №1 д/2244), з метою виявлення розташування зон дефектів та відповідності розрахункового та експериментального прогинів [2] на кожному етапі розрахунків.



Рис. 1. Схема завантаження плити контрольним навантаженням по жорсткості, міцності та тріщиностійкості

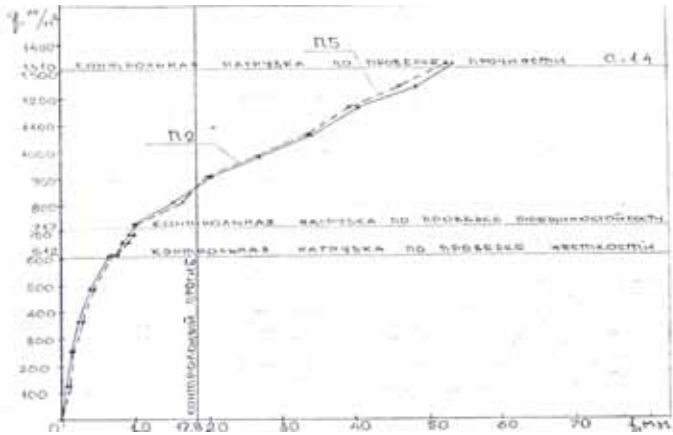


Рис. 2. Залежність прогинів плити від рівня навантаження [2]

Плита витримала навантаження контрольним навантаженням по перевірці міцності  $q=13,27 \text{ кН/м}^2$  ( $c=1,42$ ). Прогин по перевірці жорсткості склав 6,9 мм, що не перевищує контрольний, рівний 17,8 мм за проектом. При контрольному навантаженні по перевірці тріщиностійкості ширина розкриття тріщин в плиті 0,15мм, що не перевищує контрольну величину 0,25 мм [2].

Розрахункову модель прийнято у вигляді просторової моделі плити фактичного перерізу, яка моделюється: фізично нелінійним універсальним просторовим шестивузловим ізопараметричним скінченним елементом - тип 234 та фізично нелінійним універсальним прямокутним скінченним елементом оболонки – тип 241.

Етапи розрахунку у відповідності до розбиття кроковим процесором ПК ЛІРА-САПР вказані на рис. 3.

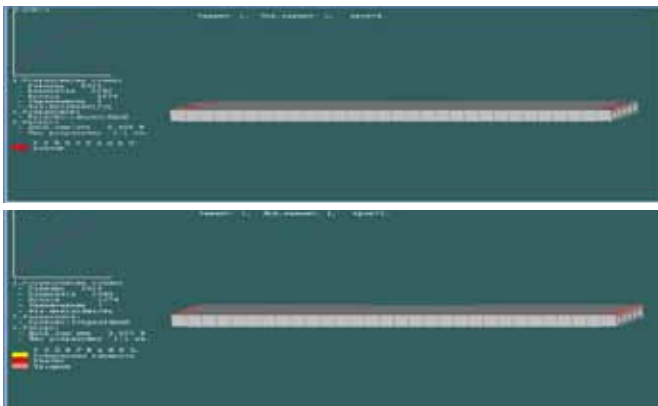


Рис. 3. Деякі етапи розрахунку кроковим процесором ПК ЛІРА -САПР

**Обговорення результатів.** За результатами розрахунку можна спостерігати відповідність зон утворення дефектів на кожному етапі навантаження при випробуванні плити та розрахунку в ПК ЛПРА-САПР (рис.3.), також проаналізовано прогин плити на кожному етапі навантаження.

При завантаженні  $13,2 \text{ кН/м}^2$ , близькому до експлуатаційного, параметри НДС перекриття при лінійно-пружному розрахунку відрізняються від параметрів, отриманих при нелінійному розрахунку при аналогічному завантаженні. Аналіз отриманих даних показав, що в результаті перерозподілу зусиль згинаючий момент змінився на 3%, прогин збільшився на 2,8%, зони і послідовність утворення дефектів співпадають з результатами натурного експерименту. В результаті дослідження був зроблений висновок: наскільки неповною є інформація, отримана на основі лінійно-пружного розрахунку, порівняно з інформацією на основі комп'ютерного моделювання процесу завантаження конструкції у фізично - нелінійній постановці. Такий розрахунок дозволяє найдетальніше досліджувати НДС і сприяє точнішому проектуванню їх елементів.

**Висновки.** Важливою особливістю реальних матеріалів є нелінійний характер залежності між напруженнями та деформаціями. Врахування таких особливостей деформації матеріалів конструкцій в розрахунку дозволяє наблизити теоретичні прогнози до реальної їх поведінки. Виявлено, що при розрахунках у програмному комплексі «ЛПРА-САПР» величини прогинів співпадають з отриманими при натурних випробуваннях з різницею до 3%.

Чисельним моделюванням виявлено, що найбільше наближений до даних натурних випробувань результат розрахунку за варіантом просторової моделі плити фактичного перерізу, яка моделюється тривимірними скінченними елементами з урахуванням розташування робочої арматури, але така модель є найскладнішою з досліджених, за результатами розрахунку такої моделі складно визначити розрахункові внутрішні зусилля в плиті (згинаючі моменти та перерізуючі сили).

## ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Городецкий А.С. Компьютерные модели конструкций / А. С. Городецкий, И. Д. Евзеров. – К.: Издательство «Факт», 2007. – 394 с.
2. Заключение №87 о результатах испытаний пустотных плит перекрытий ПК 60-15-8 АгV серии 1.141.1 в.63, (письмо №388 от 21.12.1995г.).
3. Клованич С.Ф. Метод конечных элементов в нелинейных задачах инженерной механики / С. Ф. Клованич. – Запорожье, 2009. – 400 с.
4. Клованич С.Ф. Метод конечных элементов в механике железобетона / С. Ф. Клованич, И. Н. Мироненко. – Одесса, 2007. – 110 с.
5. ЛПРА - САПР 2011. Учебное пособие / [Ю. В. Гензерский, Д. В. Медведенко, О. И. Палиенко, и др.] – К.: Электронное издание, 2011г., – 396с.
6. Перельмутер А.В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / А.В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – М.: Издательство ДМК Пресс, 2007. – 600 с.