УДК 624.012.45:624.042.2;
DOI <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.3-2/25>

Срібняк Н.М.

Сумський національний аграрний університет

Циганенко Л.А.

Сумський національний аграрний університет

Циганенко Г.М.

Сумський національний аграрний університет

Івченко В.Д.

Сумський національний аграрний університет

СПІЛЬНА РОБОТА ПЛИТ У ЯЧЕЙЦІ ПЕРЕКРИТТЯ

Залізобетонні конструкції перекриттів і покриттів становлять майже 20% вартості всієї будівлі. Ці конструкції є досить матеріаломісткими й працемісткими, оскільки на них припадає близько 30–40% бетону й сталі, що використовуються для зведення будівлі. Перекриття мають функції розмежування й утримування навантаження, але крім того вони є горизонтальними діафрагмами жорсткості будівлі. Також перекриття перерозподіляють зусилля від горизонтального вітрового навантаження між вертикальними елементами будівлі й нівелюють напруження, що виникають від неточності монтажу.

Тому проектування конструкцій перекриттів повинно базуватися на експериментально-теоретичних дослідженнях дійсних умов їхньої роботи та взаємодії в складі будівель і споруд та розробці на цій основі вдосконалених методів розрахунку, що враховують їхню просторову роботу.

Моделювання дійсних умов роботи конструкцій забезпечується створенням розрахункової схеми, яка враховує спільну роботу всіх елементів будівлі чи споруди. Метод кінцевих елементів, який реалізується в багатьох сучасних програмних комплексах, дає змогу більш точно моделювати розрахункові схеми конструкцій і враховувати їх сумісну роботу. В статті розглянуто та змодельовано декілька умов, за яких відбувається перерозподіл внутрішніх зусиль і напружень. Установлено, що зусилля в окремих плитах змінюються значно у випадку завантаження окремої плити локальним навантаженням чи мінімумом спирання на стіни однієї з плит ячейки перекриття. Окрім зміни та перерозподілу моментів вигину значною мірою збільшуються крутні моменти в окремих елементах ячейки за зміни умов спирання ячейки перекриття.

Наявність і величина моментів кручення за традиційного проектування не враховується. В роботі доведено факт спільної роботи збірних плит перекриття, що з'єднані між собою швом замоноличення й анкерними елементами в ячейці перекриття. Врахування спільної роботи дає змогу більш точно визначати зусилля в елементах ячейки, а значить, раціональніше проектувати ці елементи.

Ключові слова: *плита, перекриття, напруження, зусилля, шпонка.*

Постановка проблеми. У складі будівель перекриття й покриття виконують важливі функції: несуть вертикальні навантаження; беруть участь у забезпеченні просторової жорсткості будівлі, виконуючи функції горизонтальних діафрагм жорсткості та перерозподіляючи між вертикальними елементами зусилля від вітрового навантаження й неточності монтажу. Одночасно елементи перекриття й покриття є огорожувальними конструкціями; слугують для пропуску інженерних комунікацій, технологічного обладнання й підвішування підйимально-транспортних механізмів. Перекриття й покриття, особливо великопрольотні, є

матеріаломісткими й трудомісткими елементами, на які припадає близько 30–40% бетону й сталі, що йдуть на зведення будівлі. Тому проектування конструкцій перекриттів повинно базуватися на експериментально-теоретичних дослідженнях дійсних умов їхньої роботи та взаємодії в складі будівель і споруд та розробці на цій основі вдосконалених методів розрахунку, що враховують їхню просторову роботу. У зв'язку з викладеним дослідження просторової роботи перекриттів, що має на меті уточнення напружено-деформованого стану й більш економічне їх проектування, є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В [1] зазначено, що розрахунку просторової роботи ребристих, суцільних і пустотних систем присвячено безліч робіт учених різних країн [2–8]. Розрахунки збірних і монолітних перекриттів з урахуванням просторової роботи в основному базуються на розрізанні на окремі балки та складанні умов спільності деформацій суміжних елементів. Невідомі внутрішні зусилля представляються в основному у вигляді рядів Фур'є. Є точні рішення з використанням диференціальних рівнянь [3; 9; 10], засновані на методі В.З. Власова. Методи інженерних розрахунків розроблені Б.В. Карабановим [11], однак і вони не передбачають варіантного проектування з урахуванням різного розташування навантажень з метою попереднього підбору арматури для подальшого точного розрахунку з урахуванням тріщиноутворення, дефектів та інших чинників.

Найпростішим у реалізації на сьогодні є метод кінцевих елементів, що реалізується в багатьох програмних комплексах. Цей метод належить до числових методів розрахунку [12; 13] та дає змогу здійснювати статичний розрахунок будівельних конструкцій з урахуванням багатьох факторів, тобто створювати розрахункову модель, умови роботи якої максимально наближені до реальних.

Постановка завдання. Метою роботи є отримання підтвердження спільної роботи збірних багатопорожнистих плит у ячійці перекриття за допомогою числового експерименту, вико-

наного за допомогою програмного комплексу (далі – ПК) Ліра-САПР. Числовий експеримент складався з декількох задач, які могли б наочно продемонструвати перерозподіл деформацій і напружень між плитними елементами. Перша модель дослідження являла собою кінцевоеlementну модель ячійки з плит, завантажену рівномірно розподіленим по площі навантаженням. Надалі порівнювалися й аналізувалися зміни напружено-деформованого стану цієї моделі за впливу різних факторів.

Такими факторами були: наявність локального завантаження однієї з плит перегородкою; спирання крайньої плити на стіни з трьох боків, часткове руйнування (вихід із ладу) однієї з плит ячійки.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розглянемо ячійку перекриття, яка складається з чотирьох збірних залізобетонних плит завширшки 1500 мм і прольотом 3880 мм. Спирання плит за короткими сторонами на стіни прийнято шарнірним, тобто плити працюють під навантаженням за балковою схемою.

Просторова модель перекриття (далі – «вихідна схема») показана на рис. 1.

Розміри плит 1500 × 3880 × 220 мм марки ПК 39.15-8 серії 1-141-1 за ГОСТ 9561-91. Схема змодельована пластинчатими кінцевими елементами № 22 типу «плита». Наявність порожнин плити врахуємо призначенням пластинчатому елементу ортотропних властивостей, тобто приймаємо

Рис. 1. Схема ячійки зі збірних багатопорожнистих плит перекриття завантажена рівномірно розподіленим по площі навантаженням «вихідна модель» – а; просторова модель ячійки в ПК Ліра-САПР – б

різну жорсткість за двома напрямками плити. Реальний поперечний переріз багатопорожнистої плити замінено на приведений двотавровий переріз. Обчислено модулі пружності для приведених поперечного й поздовжнього перерізів за рис. 2, б, в: $E_{x_red} = 691200 \text{ кН/м}^2$ та $E_{y_red} = 7611000 \text{ кН/м}^2$. Спільна робота плит в ячійці перекриття забезпечується завдяки замоноличуванню бокових шпонок, що розташовані по довгих сторонах плит та завдяки влаштуванню анкерування плит між собою та зі стінами, що несуть, та на які спираються плити. В розрахунковій схемі таке конструктивне вирішення може бути представлене у двох варіантах: за допомогою застосування функції «об'єднання переміщень вузлів» та введенням до розрахункової схеми вздовж довгих сторін плит стрижнів із шарнірами на кінцях. Порівняльний аналіз зусиль показав, що ці два способи апроксимації поздовжніх швів між плитами є рівнозначними. Оберемо другий спосіб завдання швів між плитами, тобто застосуємо опцію «об'єднання переміщень суміжних вузлів по вертикалі».

Ячейка завантажена рівномірним розподіленням навантаженням $6,4 \text{ кН/м}^2$, яке складається з власної ваги конструкції та корисного навантаження.

Як було розглянуто вище, розглянемо три варіанти, які доводять, що відбувається перерозподіл внутрішніх зусиль та напружень в окремих плитах ячейки:

- крайня плита спирається довгою стороною на стіну (рис. 2, а);
- на другу з лівого боку ячейки плиту спирається перегородка; (рис. 2, б);
- в наслідок руйнування жорсткість другої з лівого боку плити понижена (рис. 2, в).

Епюри ізополів напружень по M_x та M_y для рівномірно завантаженої ячейки наведено на рис. 3. Так, з рис. 3 видно, що розподіл внутрішніх напружень є симетричним і рівномірним.

На рис. 4 наведено ізополі напружень по M_x (кНм/м) і порівняльні графіки погонних моментів M_x , що діють у перетині плит, ортогональному до осі X. Графіки побудовані для вихідної схеми за рис. 1, а та для схеми за рис. 2, а.

На рис. 5 наведено графіки напружень від крутних моментів M_{xy} і поперечної сили Q_x для вихідної схеми за рис. 1, а та для схеми за рис. 2, а.

Для нежорсткої перегородки більша частина її ваги (60%) приймається розподіленою по довжині перегородки (на ділянках між прорізами), а 40% – у вигляді зосереджених сил [14]. Отже, завантажимо посередині другу від лівого краю ячейки плиту вздовж довгої її сторони (рис. 2, б і рис. 6)

точковими силами $P=0,75 \text{ т}$, що прикладені на відстані $L/12 = 3,88/12 = 0,32 \text{ м}$, змодельовавши таким чином 40% ваги перегородки на плиту. Інші 60% ваги перегородки за допомогою опції «навантаження-штамп» в ПК Ліра-САПР змодельуємо лінійно розподіленим навантаженням інтенсивністю $q=0,53 \text{ т/м}$ з кроком триангуляції $0,1 \text{ м}$.

На рис. 7 наведено порівняльні графіки погонних моментів M_x , що діють у перетині плит, ортогональному до осі X. Графіки побудовані для вихідної схеми за рис. 1, а та для схеми за рис. 2, б.

Рис. 2. Фактори, які виявляють спільну роботу плит у складі ячейки перекриття: крайня плита спирається довгою стороною на стіну – а; завантаження локальним навантаженням – б; за виключення з роботи однієї з плит ячейки – в

На рис. 8 наведено графік зміни моменту вигину M_x для моделі ячейки з плит, у яких з роботи «виключено» одну з плит (рис. 2, в). Моменти кручення M_{xy} та поперечна сила Q_x залишилися без змін, тому графіки зміни цих зусиль наводити не будемо.

Аналіз числових досліджень. Виконані числові дослідження показують суттєву зміну напру-

жено-деформованого стану перекриття за врахування сумісної роботи плит.

У разі спираання поздовжньою стороною на стіну однієї з плит слід відзначити такий характер зміни внутрішніх зусиль: момент вигину M_x і поперечна сила Q_x суттєво зменшилися, але у 2,67 раза збільшився крутний момент M_{xy} . Наявність і величина моментів кручення за традиційного проектування

Рис. 3. Ізополя напружень від моментів вигину: по M_x – а; по M_y – б

Рис. 4. Ізополя напружень по M_x – а; графіки моментів M_x для вихідної схеми за рис. 1, а та для схеми за рис. 2, а

а)

б)

Рис. 5. Графіки погонних зусиль від моментів M_{xy} – а; від поперечних сил Q_x – б та Q_y – в для вихідної схеми за рис. 1, а та схеми за рис. 2, а

Рис. 6. Моделювання навантаження від перегородки на другу з лівого боку плити; загальний вигляд навантаженої ячейки з чотирьох плит погонних моментів M_x , що діють у перетині плит, ортогональному до осі X. Графіки побудовані для вихідної схеми за рис. 1, а та для схеми за рис. 2, а

не враховується, що суперечить реальній картині напружено-деформованого стану перекриття.

Аналіз другої моделі показує, що, навпаки, моменти вигину M_x мають тенденцію до збіль-

шення в усіх плитах ділянки. В усіх плитах, окрім завантаженої локально, вони збільшилися рівномірно й на однакову величину. У плиті, на яку прикладено локальне навантаження, відбувається

а)

б)

в)

Рис. 7. Графіки погонних зусиль від моментів M_x – а; від крутних моментів M_{xy} – б; поперечних сил Q_x – в для вихідної схеми за рис. 1, а та для схеми за рис. 2, б

Рис. 8. Графіки зміни зусиль для ячейки з плит, де друга зліва плита виключена з роботи під навантаженням: від M_x – а; від M_x – б; від Q_y – в

стрибок моменту M_x . Моменти кручення M_{xy} зменшилися в 5,7 раза лише в середині прольоту кожної з плит ячейки (рис. 7, б); в приопорних зонах M_{xy} залишилися без зміни в порівнянні з рівномірно завантаженою схемою. Аналогічним чином поперечна сила Q_x рівномірно зменшилася в усіх плитах ячейки в середині їхнього прольоту майже в 5 разів, а в приопорних зонах плит її значення майже не змінилося, хоча в плити, що завантажена перегородкою, відбувається збільшення (різкий стрибок) сили в приопірній зоні в 1,83 раза.

Аналіз другої моделі показує, що максимальний момент у плиті, що завантажена перегородкою, за її сумісної роботи з суміжними плитами виявляється меншим, ніж максимальний момент у цій плиті, якби вона була розрахована без урахування просторової роботи. Без урахування просторової роботи максимальний момент у плиті становить 18,5 кН м / м.п, а момент в цій плиті з урахуванням просторової роботи, становить 16,5 кН м / м.п (див. рис. 7, а), що в 1,12 раза менше. Легко перевірити, що й прогини локально завантаженої плити в складі перекриття також виявляються значно меншими, ніж прогини в плиті, що розрахована без урахування просторової роботи. Це свідчить про істотний ефект просторової роботи. Це може бути використано як фактор економії матеріалів.

Так, якщо порівняти максимальний момент для схеми за рис. 1, а, то він становить 11,8 кН м / м.п, тоді як було показано вище, максимальний момент вигину для плити без урахування просторової роботи становить 18,5 кН м / м.п. Різниця між цими показниками складає 1,56 раза.

Розрахунки показують, що в перекриттях зі збірних плит в основному виникають нормальні тріщини. Дослідження, проведені в цій статті, як було зазначено вище, показали, що в плитах (навіть за відсутності спираяння поздовжніми сторонами) за локальних навантажень виникає крутий момент. Перерозподіл навантаження між окремими плитами залежить як від жорсткостей на вигин, так і від жорсткості на кручення. У зв'язку з цим виникає досить істотна проблема врахування зміни жорсткості залізобетонних плит з нормальними тріщинами. Водночас практично всі відомі методи розрахунку жорсткості для залізобетонних елементів припускають наявність у них просторових тріщин, хоча експериментальні дослідження авторів статті [15] говорять про суттєвий вплив нормальних тріщин на крутильні жорсткості залізобетонних елементів.

Таким чином, дослідження, яким присвячена ця стаття, відкривають завдання для подальших досліджень роботи перекриттів зі збірних залізобетонних плит.

Висновки. Аналіз проведених розрахунків показує, що врахування спільної роботи плит істотно змінює картину напружено-деформованого стану перекриття. Згинальні моменти в окремих плитах зменшуються (можуть досягати декількох разів). Крім того, виникають суттєві круті моменти, що не враховуються в реальному проектуванні. Особливо це стосується перекриттів, одна або обидві поздовжні сторони яких сперті на стіни. Неврахування крутих моментів може призвести до того, що в плитах утворюватимуться тріщини кручення, а це може спричинити обвалення. Крім того, виникнення істотних

поперечних сил взаємодії може призвести до зрізу бетонних шпонок, що також слід брати до уваги під час розрахунків за реального проектування.

З іншого боку, розрахунки з урахуванням просторової роботи перекриття показують: згинальні моменти й прогини плит істотно зменшуються.

Це можна використовувати як можливість економії матеріалів.

Таким чином, врахування просторової роботи перекриття, з одного боку, підвищує надійність проектування, усуває небезпеку недооцінювання чинників, а з іншого боку, дає змогу економити матеріальні витрати.

Список літератури:

1. Азизов Т.Н. Пространственный расчет ребристых перекрытий по огибающим эпюрам / Т.Н. Азизов, Н.Н. Голодкова. *Збірка наукових праць. Серія «Галузеве машинобудування».*
2. Байков В.Н. Исследование совместной работы сборных железобетонных элементов в системах плоских и пространственных конструкций : дис. ... доктора техн. наук. Москва, 1967.
3. Краснощек Ю.В., Мрачковский Л.И. Работа ребристых плит в сборных железобетонных настилах. *Бетон и железобетон.* 1991. № 1. С. 28–30.
4. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелых и легких бетонов без предварительного напряжения арматуры. Москва : ЦИТП, 1986. 192 с.
5. Власов В.З. Тонкостенные пространственные системы. Москва : Госстройиздат, 1958. 502 с.
6. Семченков А.С. Пространственно деформирующиеся железобетонные диски перекрытий многоэтажных зданий. Экспериментальные исследования, практические методы расчета и проектирование : дис. ... докт. техн. наук : 05.23.01. Москва, 1991. 703 с.
7. Семченков А.С. Расчет сборных железобетонных перекрытий как полубезмоментных конструктивно-ортотропных пластин. *Известия вузов. Серия «Строительство и архитектура».* 1974. № 5. С. 16–23.
8. Семченков А.С., Десятник Е.И. Совершенствование 12-метровых плит 2Т. *Бетон и железобетон.* 1992. № 5. С. 2–4.
9. Азизов Т.Н. Пространственная работа железобетонных перекрытий. Теория и методы расчета : дис. ... докт. техн. наук : 05.23.01 ; Полтавский национальный технический университет. Полтава, 2006. 406 с.
10. Дроздов П.Ф. Расчет сборных перекрытий, опирающихся на внутренние и наружную стены. *Сборник трудов Научно-исследовательского института строительных конструкций. Серия «Строительные конструкции».* Вып. XII. Киев, 1969. С. 120–129.
11. Карабанов Б.В. Нелинейный расчет сборно-монолитных железобетонных перекрытий. *Бетон и железобетон.* 2001. № 6. С. 14–18.
12. Клованич С.Ф. Расчет железобетонных конструкций методом конечных элементов при длительных воздействиях. *Будівельні конструкції.* Вип. 62. Т. 1. Київ : НДІБК, 2005. С. 518–523.
13. Метод конечных элементов / П.М. Варвак и др. Київ : Вища школа, 1981. 176 с.
14. Каманин А. Обучающее видео LIRA SAPR. Расчет плит перекрытия на нагрузки от перегородок [Электронный ресурс]. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=2Pth9FC0JCw>.
15. Срібняк Н.М. Крутильна жорсткість залізобетонних елементів перекриттів з нормальними тріщинами : дис. ... канд. тех. наук : 05.23.01. Одеса, 2009. 253 с.

Sribniak N.M., Tsyhanenko L.A., Tsyhanenko H.M., Ivchenko V.D.

THE JOINT BEHAVIOR OF PREFABRICATED FLOOR SLABS IN A LOCATION

Reinforced concrete structures of floors and roof slabs account for more than 20% of the total cost of a building. These structures are quite material-intensive and labor-intensive because they account for about 30–40% of concrete and steel used in the construction of the building.

Floor slabs are load bearing constructions as well as horizontal diaphragms of rigidity of the building.

They also redistribute the internal forces from the horizontal wind load between the vertical elements of the building (the columns) and level the stresses arising because of mounting misalignment.

Therefore, the design of these floor structures should be based on experimental and theoretical researches of the actual conditions of their work, on buildings and constructions interaction and improved design methods, which takes into account their spatial behavior.

Modeling of actual working conditions of structures is provided by an analytical modeling, which takes into account combined actions of all elements of the building or construction. The finite element method (FEM) is implemented in many modern software packages. FEM allows more accurate modeling of the analytical models of structures and takes into account their joint behavior.

Several conditions of redistribution of internal forces and stresses are considered and modeled in the article. It is found, that the internal forces in separate floor slabs change significantly because of loading a

separate floor slab with local load. The slab-wall junction by long side also leads to a change of the internal forces in the floor slabs. When changing the conditions of slab-wall junction, the torques in the separate slabs increase significantly. In traditional design Torque and its values are not taken into account.

The article proves the joint behavior of prefabricated floor slabs interconnected by a self-locking seam and anchor elements in the floor cell. Taking into account the joint work allows us to determine the effort in the cell elements more accurately and, therefore, to design these elements more rationally.

Key words: slab, overlap, stress, internal forces, key.