

УДК 69.05

ОЦІНКА ВПЛИВУ РОЗРИВУ В БЕТОНУВАННІ ПЛИТИ ПЕРЕКРИТТЯ СИСТЕМИ «МОНОФАНТ» НА ЇЇ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН

Д-р техн. наук В. С. Шмуклер, кандидати техн. наук П. А. Резнік, О. О. Петрова, здобувач В. Б. Нікулін, магістранти М. В. Місюра, М. Ю. Богомаз

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF THE DIVIDE IN THE CONCRETE SLAB OF THE MONOFANT SYSTEM ON ITS STRESS-STRAIN STATE

D. Sc. (Tech.) V. Shmukler, PhD (Tech.) P. Reznik, PhD (Tech.) O. Petrova, postgraduate student V. Nikulin, master M. Bohomaz, master M. Misiura

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.185.2019.180817>

У статті розглянуто питання організації горизонтального шва розриву бетонування в плиті перекриття системи «Монофант». Побудовані скінченно-елементні моделі плити перекриття з різними варіантами моделювання власне шва розриву за допомогою плоских та об'ємних скінченних елементів. Аналіз запропонованих конструктивів виконаний методом порівняння з традиційною плитою перекриття системи «Монофант» без шва розриву бетонування. Отримані чисельні результати значень максимальних прогинів та потенційної енергії деформації в системі, які дозволяють зробити висновок про те, що наявність шва майже не впливає на міцність і деформативність конструкції зі швом розриву.

Ключові слова: скінченний елемент (СЕ), напружено-деформований стан (НДС), потенційна енергія деформацій (ПЕД), щільність потенційної енергії деформацій (ЩПЕД), шов розриву бетонування, вкладиш-пустотоутворювач, система «Монофант».

The paper deals with the organization of the horizontal divide during the concreting of overlapping slab of the "Monofant" system. It is known that according to the Ukrainian State Building Codes (DBN) there should be no horizontal divide in flat developed in plan structures such as foundations or overlapping slabs. This investigation is aimed to approve that horizontal divide may take place in real construction conditions and according to the numerical studies there is no big difference between traditional "Monofant" slab and those one which have the divide discussed

above. For this case, finite element models of overlapping slab with different variants of modeling of the divide with the help of flat and volumetric finite elements were constructed. The analysis of the proposed structures was performed by the method of comparison of the overlapping slab of the "Monofant" system with and without divide in concreting. The slab with dimensions 6x6m and general thickness 200mm, which have lower and upper flanges with the thickness of 50mm is considered in numerical analysis. The middle part of the slab filled with insert void-former (for example, polystyrene). The width of monolithic ribs between inserts is 100mm. For all cases of the horizontal divide its thickness is adopted 10mm. In the first part of the investigation, a finite element models of the slabs made of flat finite elements with different modules of elasticity of the divide is considered. The presence of the divide leads to a slight increase in both the values of displacements and strain energy of the system, whereby, with the increase of the modulus of elasticity of the material of the divide, this difference in the values of the SSS components for two systems (with continuous and intermittent divide) is offset. In second part, the volumetric models of the traditional "Monofant" slab, a slab with continuous divide and a slab with shear bonds made of transverse reinforcement are considered. It should be noted, that the use of large diameter of bars as a transverse reinforcement, for example made of $\varnothing 12-16\text{mm}$ (unlike traditional clamps of $\varnothing 6-8\text{mm}$), can provide the necessary joint work of the structure with the horizontal divide in concrete even after a long break. In general, the numerical results of the values of maximum deflections and potential deformation energy in the system which were obtained, allow to conclude that the presence of a divide almost does not affect the strength and deformability of the structure.

Keywords: finite element (FE), stress-strain state (SSS), strain energy, strain energy density (SED), concreting divide, insert void-former, "Monofant" system.

Вступ. На сьогоднішній день українському будівельному ринку властива ситуація, коли фінансування проекту будівництва тимчасово або повністю припиняється. Тоді забудовник вимушений призупинити будівельні роботи на майданчику або зовсім його «заморозити». Для вітчизняної реальності подібний випадок скоріше є закономірністю, аніж випадковістю, і відновлення будівельних робіт після тривалого періоду консервації об'єкту в загальному випадку не є проблемою. Проте особливу категорію конструкцій тут складають конструктиви з вкладишами-пустотоутворювачами [1]. Як відомо, система «МОНОФАНТ», що передбачає зведення прямолінійних та криволінійних конструкцій з вкладишами з пінополістиролу чи мінеральної вати [2, 3], набула широкого розповсюдження в житловому та цивільному будівництві. Особливістю системи є захоронювання всередині конструкції пустотоутворювача, що формує складну внутрішню геометрію конструктиву, яка відповідає наперед

заданим обмеженням [4,5]. Сумісність роботи верхнього і нижнього шарів бетону в плитах перекриття з вкладишами забезпечується за рахунок внутрішніх ребер та технології одностадійного бетонування за допомогою самоущільнюваного бетону [6]. Тому науковий і практичний інтерес являє віртуально можлива ситуація, коли процес бетонування конструкцій з вкладишами-пустотоутворювачами штучно переривається і виникає горизонтальний шов розриву бетонування, оскільки відновлення процесу бетонування може настати через кілька днів, тижнів чи навіть років.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Згідно з п. 7.14 ДБН В.2.3-20-2008 [7] «Бетонну суміш укладають у формувальну оснастку або опалубку горизонтальними шарами однакової товщини без розривів із послідовним напрямком укладання в один бік у всіх шарах», тобто при бетонуванні конструкцій, розвинутих в плані, наприклад, фундаментних плит чи плит перекриттів, наявність горизонтального шва розриву

взагалі є недопустимою. Проте дані рекомендації сформовані виключно на базі існуючого багаторічного досвіду зведення будівель і споруд без підтвердження будь-якими, тим паче розрахунковими, аргументами. У зв'язку з цим в даному дослідженні запропоновані конструктивні рішення з організації горизонтального шва розриву, що базуються на ідеології створення зв'язків зсуву за рахунок установлення робочої поперечної арматури або застосування сучасних матеріалів шва, які компенсують створюваний розрив в шарах бетону і устанавлюються прямим розрахунком [4].

Визначення мети та завдання дослідження. З метою визначення впливу розриву в бетонуванні на напружено-деформований стан перекриття з вкладишем запропоновано моделювання і розрахунок розглянутого об'єкту за допомогою програмних комплексів, фіндованих методом скінченних елементів, а саме «Ліра Сапр» і «Ліра 10.6» [8].

Чисельні дослідження передбачають створення і аналіз особливостей двох ідеологічно різних моделей:

- просторова модель плити перекриття, яка виконана з плоских скінченних елементів (СЕ) з різними видами моделювання шва розриву бетонування;
- просторова модель плити перекриття, що виконана з об'ємних скінченних елементів з урахуванням реального розташування випусків поперечної арматури, що розглядається як робоче, а не конструктивне армування.

Завданням дослідження є визначення основних компонентів НДС (максимальних прогинів, значень ПЕД та ЩПЕД) конструкції для всіх розглянутих варіантів конструкції.

Основна частина дослідження. Для всіх випадків моделювання розглянута плита з розмірами в плані 6×6 м товщиною 200 мм. Плита має внутрішні вкладиші-пустотоутворювачі товщиною 100 мм, при цьому верхня і нижня обшивки плити

мають товщину 50 мм, а ширина внутрішніх ребер складає 100 мм. Клас бетону прийнятий С20/25 ($f_{cd} = 14.5$ МПа, $E_{cd} = 23000$ МПа); поздовжня арматура класу А400С; поперечна арматура – Ø12А400С, устанавлена з кроком 200 мм. В розрахунках порівнюється традиційна плита системи «Монофант» з вкладишами-пустотоутворювачами та плити з різними варіаціями шва розриву бетонування, товщина якого складає 1 см.

Навантаження величиною 10 кН/м^2 прикладене до верхньої обшивки. Обпирання плити прийняте шарнірним по чотирьох кантах. По всіх чотирьох крайніх гранях заборонені вертикальні переміщення по осі Z, на одній грані уздовж глобальної осі Y заборонені переміщення по осі X, на одній грані уздовж глобальної осі X заборонені переміщення по осі Y. Відповідно в одному крайньому вузлі заборонені переміщення по всіх трьох осях X, Y, Z.

Далі більш детально зупинимося на особливостях моделювання і розрахунку кожного з варіантів плити.

Моделювання плити плоскими скінченними елементами

Модель плити перекриття виконана з універсальних прямокутних СЕ оболонки № 41. Розміри і форма СЕ елементів, що утворюють розглянуту модель, прийняті такими:

- верхня і нижня обшивки – квадратні СЕ з розміром сторони 10 см, товщина оболонки становить 5 см;
- ребра – прямокутні за формою СЕ з розмірами 10×2.5 см і 10×4 см, товщина оболонки становить 10 см;
- шов розриву бетонування – прямокутний за формою СЕ з розмірами 10×1.0 см, товщина оболонки становить 10 см.

В ході моделювання розглянуто два типи шва бетонування: безперервний шов і шов з розривами, рівними 10 см. В розрахунках плити перекриття розглянуті обидва типи швів з різним модулем пружності матеріалу швів, який приймався

відповідно 100, 1000, 2500, 5000, 10000, 15000, 20000 і 23000 МПа.

Загальна кількість вузлів і елементів в моделях з безперервним швом бетонування складає 11467 і 12240 відповідно.

Загальна кількість вузлів і елементів в моделях з розривом шва бетонування складає 11467 і 11820 відповідно.

Нижче наведені скінченноелементні моделі плити взагалі, окремо ребер та швів відповідно (рис. 1–4).

Результати розрахунків розглянутої моделі плити подано у вигляді полів вертикальних переміщень та щільності потенційної енергії деформацій, наведених в таблиці.

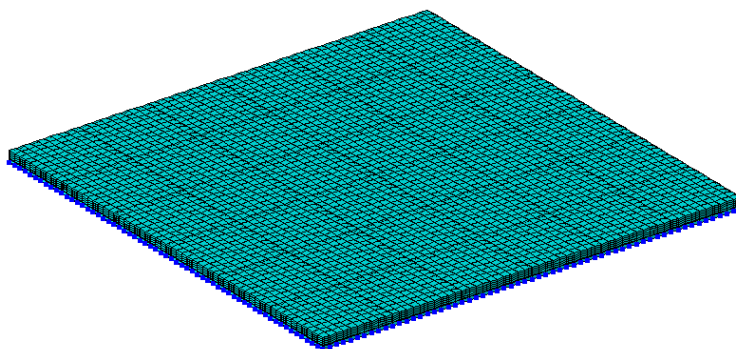


Рис. 1. Скінченноелементна модель плити, виконана з плоских скінченних елементів

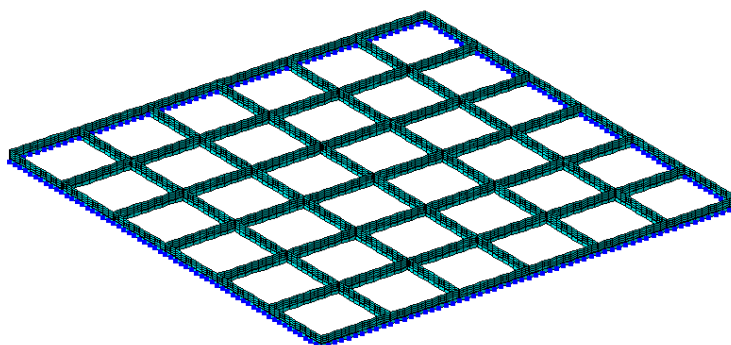


Рис. 2. Скінченноелементна модель внутрішніх ребер плити з плоских СЕ

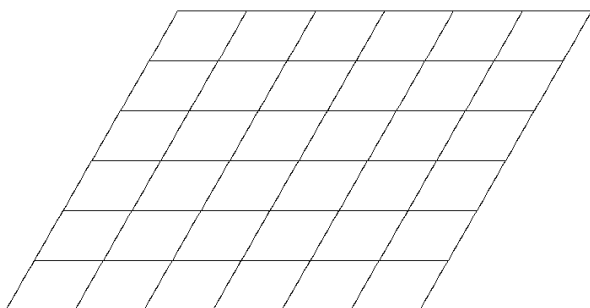


Рис. 3. Скінченноелементна модель суцільних швів бетонування плити з плоских СЕ

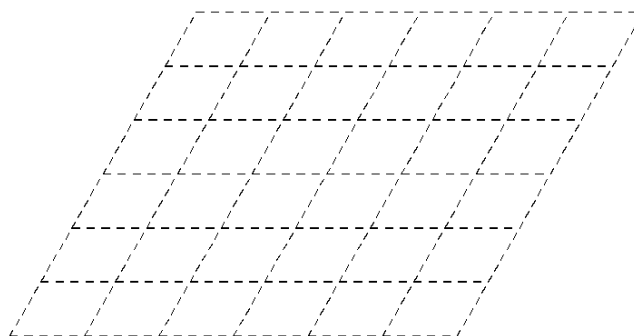
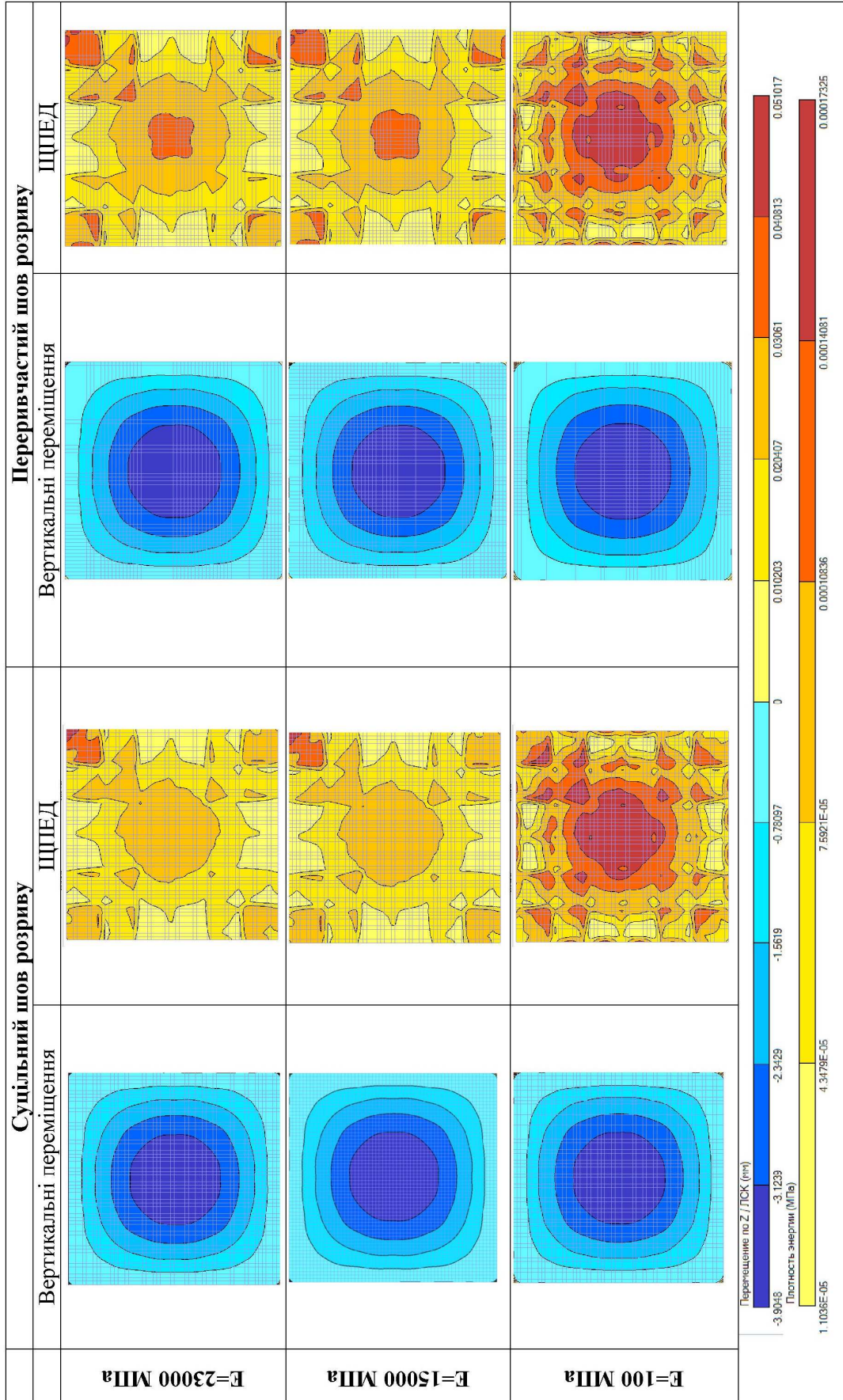


Рис. 4. Скінченноелементна модель переривчастих швів бетонування плити з плоских СЕ

Таблиця

Порівняння компонентів НДС для двох варіантів шва розриву моделі з плоских СЕ



Як видно з таблиці, щільність потенційної енергії для модулів шва $E = 23000$ МПа і $E = 100$ МПа (варіант суцільного шва розриву) відрізняється візуально за формою ізополів і значеннями, проте основна закономірність розподілу ЩПЕД для цього типу плити із заданим закріпленням і навантаження зберігається. Якщо відкинути "сплески" значень ЩПЕД, пов'язані з особливостями закріплення просторової моделі плити, то найбільші значення виникають у центрі плити. При модулі $E = 23000$ МПа вони рівні $147,55 \cdot 10^{-6}$ МПа, а при модулі $E = 100$ МПа –

$159,3 \cdot 10^{-6}$ МПа. Різниця складає майже 8 %. При підвищенні модуля пружності шва до $E = 15000$ МПа і характер ізополів ЩПЕД вирівнюється з варіантом для $E = 23000$ МПа, і самі значення ЩПЕД відрізняються в межах 1-2 %. Аналогічна закономірність простежується і в варіантах з розривом швів. Додаткові результати розрахунку наведені на рис. 5–6 у вигляді графіків залежності переміщень і потенційної енергії деформації розглянутих конструктивів від модуля пружності матеріалу шва бетонування.

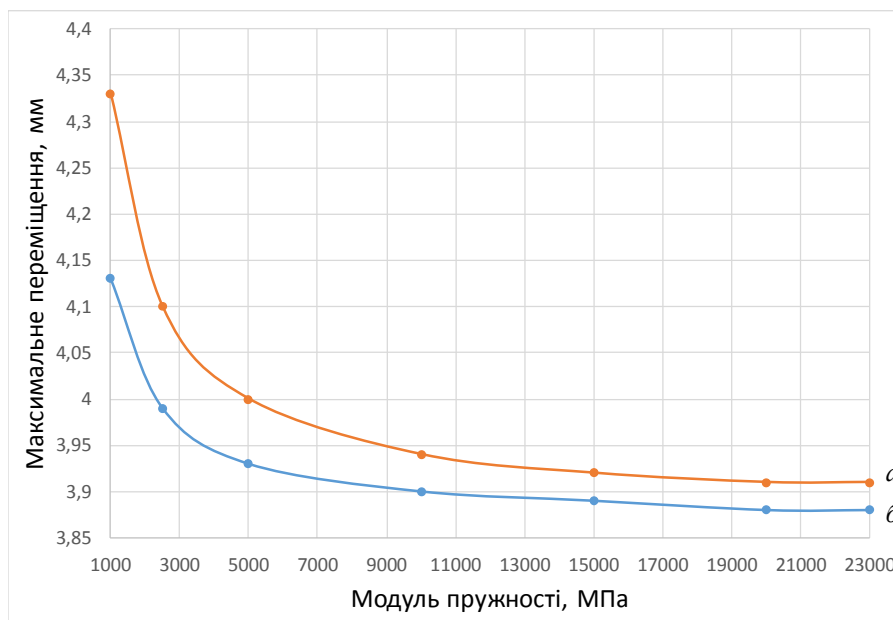


Рис. 5. Залежність максимального переміщення плити перекриття від значення модуля пружності матеріалу шва для плити із суцільним швом бетонування (б) і переривчастим (а)

Як видно з отриманих результатів, наявність розриву у шві бетонування призводить до незначного збільшення як значень переміщень, так і значень потенційної енергії деформації системи, причому, із збільшенням модуля пружності матеріалу шва дана різниця в значеннях компонентів НДС двох систем (із суцільним і переривчастим швом) нівелюється. Слід також відмітити, що варіант плити з суцільним швом бетонування і модулем пружності

матеріалу шва, рівним 23000 МПа, опосередковано моделює суцільну плиту із вкладишами без розриву бетонування взагалі. Для даного випадку різниця переміщень для плити з суцільним швом та переривчастим складає менше 1 %, тоді як для найнижчого значення модуля пружності (1000 МПа) ця різниця складає 4,67 %. Тим не менш, не тільки настільки невелике значення зростання переміщень, а й, що важливіше, абсолютні значення переміщень для опертї по чотирьох кантах

плити прольотом 6 м і навантаженням 10 кН/м^2 є більш ніж прийнятними. Аналогічну залежність демонструють графіки зміни ПЕД, а оскільки, відповідно до критерію Василькова-Шмуклера [4], аналіз ПЕД дає можливість оцінити НДС об'єкта з урахуванням всіх напружень, що виникають, і з урахуванням особливостей

роботи матеріалів, то попередньо можна зробити висновок про те, що наявність шва бетонування взагалі і занижені фізико-механічні показники матеріалу шва зокрема несуттєво впливають на НДС розглянутих систем. Проте для отримання остаточної відповіді необхідно додатково вирішити тривимірну задачу.

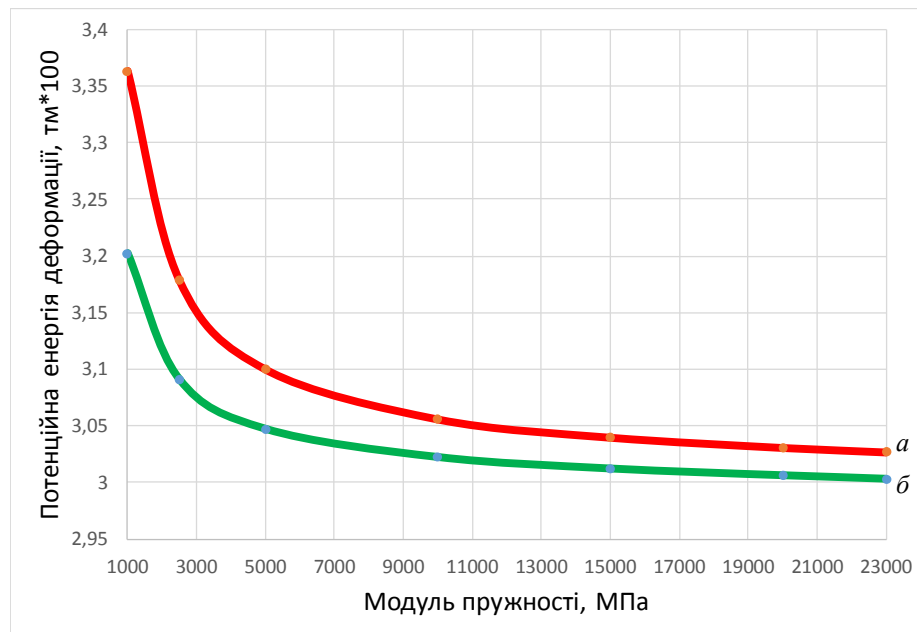


Рис. 6. Залежність потенційної енергії деформацій від значення модуля пружності матеріалу шва для плити із суцільним швом бетонування (б) і переривчастим (а)

Моделювання плити об'ємними скінченними елементами

Модель плити перекриття виконана з універсальних восьмикутних параметричних СЕ № 36 (довільний гексаедр). Даний СЕ призначений для міцнісного розрахунку континуальних об'єктів і масивних просторових конструкцій.

До розрахунку прийняті три схеми влаштування плити перекриття:

- суцільна плита перекриття з вкладишем без шва бетонування виконана з об'ємних елементів;
- плита перекриття з суцільним (безперервним) швом бетонування;
- плита перекриття з моделюванням випусків поперечної арматури.

Розміри і форма СЕ елементів прийняті такими:

- всі елементи плити перекриття – ребра, верхня і нижня обшивки – скінченні елементи кубічної форми з розміром сторони 2,5 см;
- шов розриву бетонування – паралелепіеди з розмірами 2.5×2.5 см в основі і 1.0 см заввишки. При моделюванні розглядається два типи швів: перший – безперервний шов та другий – з моделюванням тільки випусків поперечної арматури в припущенні, що в кожному ребрі встановлено $2\text{Ø}12\text{A}400\text{C}$. Для варіанта з безперервним швом бетонування модуль пружності дорівнює 2500 МПа. Для варіанта з моделюванням випусків арматури модуль пружності заданий із перера-

хунком площі арматури ($2\varnothing 12A400C$) на площу СЕ і складає 3800 МПа.

Загальна кількість вузлів і елементів в моделі без шва складала 395421 і 281024 відповідно.

Загальна кількість вузлів і елементів в моделі з безпервними швами складала 411066 і 293680 відповідно.

Загальна кількість вузлів і елементів в моделі з моделюванням випусків арматури складала 411066 і 281889 відповідно.

Скінченноелементна модель плити перекриття взагалі та ребер ідентична наведеним вище на рис. 1–4. Схема розташування випусків поперечної арматури в скінченноелементному вигляді наведена на рис. 7.

Результати розрахунку у вигляді ізополів вертикальних переміщень для всіх трьох варіантів розглянутого конструктиву наведені на рис. 8–10.

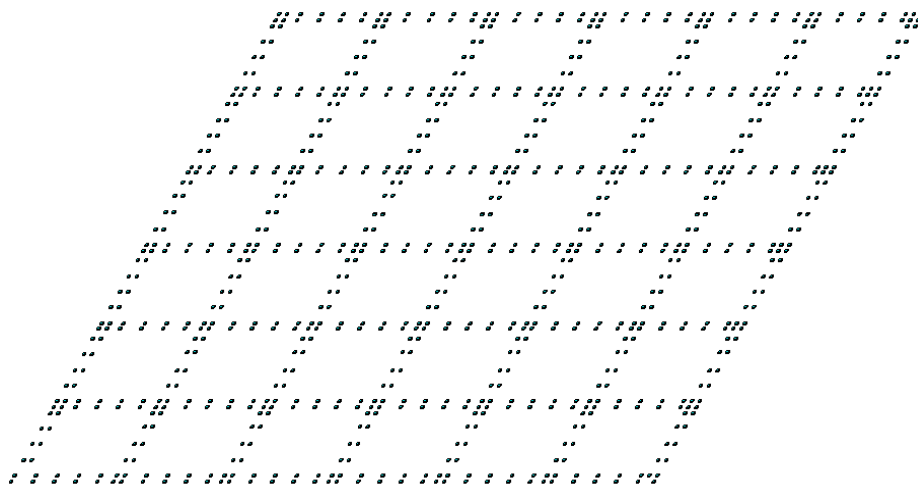


Рис. 7. Розташування СЕ, що моделюють випуски поперечної арматури в об'ємній моделі плити перекриття

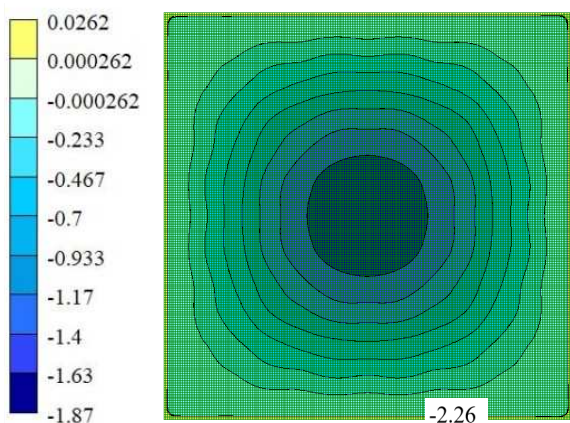


Рис. 8. Ізополе вертикальних переміщень для плити без шва бетонування, мм

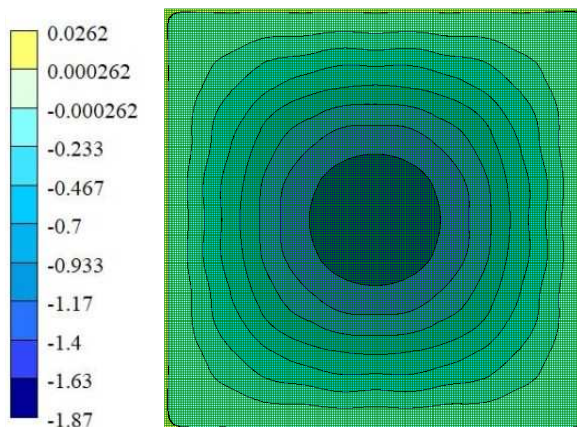


Рис. 9. Ізополе вертикальних переміщень для плити з безпервним швом бетонування, мм

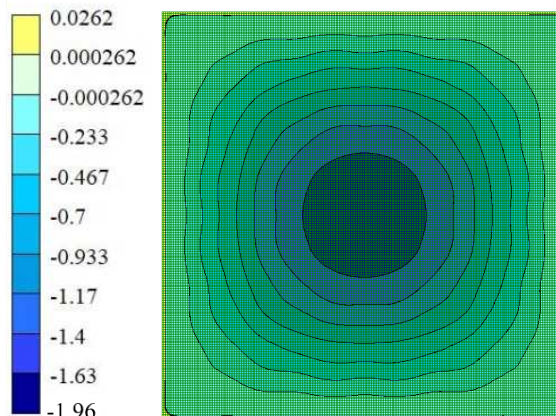


Рис. 10. Ізополе вертикальних переміщень для плити із випусками поперечної арматури, мм

За результатами розрахунків відмічається, що максимальне переміщення для моделі без шва бетонування склало 1,87 мм, для моделі з безперервним швом – 1,96 мм, а для моделі з випусками поперечної арматури – 2,26 мм. Незважаючи на те, що зростання становить ~ 20 %, абсолютні значення переміщень для плити, опертої по контуру при навантаженні 10 кН/м^2 , є незначними. Зокрема, слід зауважити, що застосування як поперечної арматури стрижнів більшого діаметра (зв'язки зсуву), наприклад, $\varnothing 12-16 \text{ мм}$ (на відміну від традиційних хомутів $\varnothing 6-8 \text{ мм}$), може забезпечити необхідну сумісну роботу конструктиву із швом розриву бетонування навіть після багаторічної перерви.

Висновки. Загалом, можна зробити висновок про те, що наявність горизонтального шва бетонування в конструкціях з вкладишем несуттєво впливає на характер напружено-деформованого стану конструкції, оскільки

різниця компонентів НДС (переміщень та значень ПЕД) плити з горизонтальним швом та без нього складає 1-5 % для моделі, виконаної з плоских СЕ, та 20 % - для моделі з об'ємних СЕ. Таким чином, в реальних випадках консервації будівництва, при відновленні бетонних робіт, допустимо і достатньо застосувати адгезивні клейові склади типу Ceresit CD-30 для забезпечення зв'язку нижньої обшивки плити перекриття з вкладишем із її верхньою обшивкою. Крім того, ще на етапі проектування можна передбачити застосування замість конструктивного армування ребер стрижнів «робочих» діаметрів, що забезпечить необхідну міцність, деформативність та надійність конструктиву плити з вкладишем навіть після довготривалої перерви в бетонуванні. Очевидно, що отримані результати допустимо вважати цілком репрезентативними після проведення експериментальної верифікації.

Список використаних джерел

1. Бугаевский С. А. Современные облегченные железобетонные перекрытия с применением неизвлекаемых вкладышей-пустотообразователей. *Науковий вісник будівництва*. 2015. № 3. С. 73–87.
2. Патент № 89464, Україна, МПК E04B 1/18. Каркасна будівля «Монофант» / Шмуклер В.С., Бабаєв В.М., Бугаєвський С.О., Бережна К.В., Карякін І.А., Кондращенко В.І.,

Сеірські І.М.; власник Шмуклер В.С.; заявка u201311919 від 10.10.2013, опубл. 25.04.2014, Бюл. №8.

3. Nikulin V, Bugayevskiy S, Gerasymenko V, Konyukhov A (2017) Basics of modeling and technology of creating reinforced concrete elements of “Monofant” system construction. In: MATEC web of conferences. Vol 116. P. 02009.

4. Бабаев В. М., Бугаевский С. А., Евель С. М., Евзеров И. Д., Лантух-Лященко А. И., Шеветовский В. В., Шимановский А. В., Шмуклер В. С. Численные и экспериментальные методы рационального проектирования и возведения конструктивных систем. Киев: Изд. «Сталь», 2017. 404 с.

5. Shmukler V., Babaev V. New constructive solutions for building of transport construction facilities. MATEC Web of conferences, 2017.Vol 116, p 02004. URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2017/30/mateconf_tr2017_02004/mateconf_tr2017_02004.html (last accessed: 04.09.2019).

6. Nikulin V., Shmukler V., Petrova O. Highly Combinatorial Reinforced Concrete Slab System. Proceedings of CEE 2019: Advances in Resource-saving Technologies and Materials in Civil and Environmental Engineering. P. 411-419. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-27011-7_52 (last accessed: 04.09.2019).

7. ДБН В.2.3-20-2008. Споруди транспорту. Мости та труби. Виконання та приймання робіт. Чинний від 2008-08-01. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-155> (дата звернення: 04.09.2019).

8. Городецкий Д. А., Барабаш М. С. и др. Программный комплекс Лира: учеб. пособие / под ред. академика РААСН А. С. Городецкого. Киев–Москва. 2013. 376 с.

Шмуклер Валерій Самуїлович, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова. Тел. (057) 707 33 77. E-mail: bk@kname.edu.ua.

Резнік Петро Аркадійович, канд. техн. наук, старший викладач кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова. E-mail: engipr@gmail.com.

Петрова Олена Олександрівна, канд. техн. наук, старш. викл. кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова. E-mail: petrova.bcd@gmail.com.

Нікулін Валерій Борисович, головний інженер ТДВ «Житлобуд-2», здобувач кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова. E-mail: petrova.bcd@gmail.com.

Богомаз Микита Юрійович, магістрант кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова. E-mail: nikitabogomaz2017@gmail.com.

Місюра Михайло Вікторович, магістрант кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова. E-mail: mis.mihail.work@gmail.com.

Valerii Shmukler, D. Sc. (Tech.), professor, Head of the Building Structures department, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. E-mail: bk@kname.edu.ua.

Petro Reznik, PhD (Tech.), Senior Lecturer, Building Structures department, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. E-mail: engipr@gmail.com.

Olena Petrova, PhD (Tech.), Senior Lecturer, Building Structures department, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. E-mail: petrova.bcd@gmail.com.

Valerii Nikulin, chief engineer ALC “Zhitlobud-2”, aspirant of the Building Structures department, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. E-mail: petrova.bcd@gmail.com.

Mykyta Bohomaz, master student, Building Structures department, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. E-mail: nikitabogomaz2017@gmail.com.

Mykhailo Misiura, master student, Building Structures department, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. E-mail: mis.mihail.work@gmail.com.

Статтю прийнято 24.06.2019 р.