

Дослідження напружено-деформованого стану конструкцій двосекційної будівлі при врахуванні спільної роботи секцій різної поверховості

Євгенія ЗАДАЧИНА¹, Вероніка ЖУК², Остап КАШОЇДА³, Олександр ГАВРИЛЮК⁴

Київський національний університет будівництва і архітектури
31, просп. Повітряних сил, Київ, Україна, 03037,

¹zadachyna_yo-2024@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0006-2828-9784>

²zhuk.vv@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-1114-3192>

³kashoida_oo@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-9234-4489>

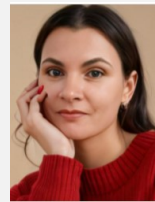
⁴gavryliuk.ov@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-7252-0679>

Анотація. Удосконалення методів проектування та підвищення надійності сучасних багатоповерхових споруд неможливі без врахування взаємодії з основою. Питання формування напружено-деформованого стану (НДС) у системі «основа - фундамент - будівля» особливо актуальне для багатосекційних будівель, де різноманітність конструктивних рішень і нерівномірність навантажень можуть спричинити складні просторові ефекти. Актуальність дослідження зумовлена тим, що при проектуванні багатосекційних будівель часто нехтують особливостями їх спільної роботи в системі «основа - фундамент - будівля», що може призводити до неточного визначення НДС, виникнення нерівномірних деформацій.

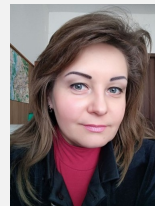
Метою дослідження було оцінити перерозподіл напружень, спричинений взаємовпливом секцій будинку. На скільки важливо розглядати кожну секцію будівлі окремо, а як єдине ціле.

Встановлено принципово інший розподіл напружено-деформованого стану конструкцій шляхом числового моделювання, яке враховує просторову взаємодію секцій. Отримані результати демонструють якісну відмінність НДС двосекційного будинку порівняно з традиційним аналізом окремих секцій, які мають різну поверховість і асиметричну форму в плані

Результати дослідження важливі для інженерної практики, зокрема при проектуванні багатосекційних будівель. Виявлено закручування секції більшої поверховості, зумовлене асиметричною плановою формою



Євгенія ЗАДАЧИНА
магістр кафедри
геотехніки



Вероніка ЖУК
доцент кафедри
геотехніки
к.т.н., доц.



Остап КАШОЇДА
доцент кафедри
геотехніки
PhD



Олександр ГАВРИЛЮК
асистент кафедри
геотехніки

секції та просторовим перерозподілом зусиль у несучих елементах. Встановлено ефект затягування секції меншої поверховості у спільну воронку осідання, що призводить до додаткових горизонтальних переміщень і виникнення крену відносно вертикальної осі.

Ключові слова. Напружено-деформований

стан (НДС), числове моделювання, ПК Ліра-САПР, ґрунтова основа, взаємовплив секцій.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Для будь-якої будівлі важливо розглядати її як систему «основа – фундамент - будівля». Особливо коли мова йде про багатосекційні будівлі - кожна секція може мати свою форму і висоту, нерівномірне навантаження через геометричні та конструктивні особливості. Усе це створює складні просторові ефекти [Shakib, 2011]. Робота присвячена питанню важливості врахування взаємного впливу секцій будинку.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Проблема підвищення надійності сучасних багатоповерхових споруд вимагає обов'язкового врахування взаємодії конструкцій із ґрунтовою основою. Питання формування напружено-деформованого стану (НДС) у системі «основа — фундамент — будівля» є предметом численних досліджень, оскільки нерівномірність навантажень у багатосекційних будинках спричиняє складні просторові ефекти [Poulos, 2023; Elsharawy, 2024].

Значний внесок у розвиток методів розрахунку фундаментів та дослідження геотехнічних систем зробили фахівці-геотехніки [Gazetas, 2001]. Зокрема, у працях [Tsige, 2023] розглядаються питання вдосконалення числового моделювання фундаментних конструкцій та оцінки впливу нових об'єктів на існуючу забудову. Проте, як свідчить практика, при проектуванні багатосекційних об'єктів часто нехтують фактором спільної роботи секцій, розглядаючи їх як ізольовані одиниці. Вітчизняні та закордонні дослідники (зокрема ті, що використовують програмні комплекси ЛІРА-САПР та інші) наголошують, що ігнорування взаємовпливу фундаментів може призводити до неточного визначення НДС. У світовій практиці приділяється значна

увага ефектам виникнення «воронки осідання» та її впливу на сусідні секції, що особливо актуально для об'єктів різної поверховості [Poulos, 2023; Elsharawy, 2024; Tsige, 2023]. Водночас питання кількісної оцінки перерозподілу зусиль у несучих елементах надземної частини при виникненні зустрічних кренів секцій потребує подальшого уточнення.

МЕТА РОБОТИ

Мета роботи – порівняння напружено-деформованого стану (НДС) окремих секцій з НДС будівлі в цілому та виявлення особливостей перерозподілу напружень і деформацій у системі.

Об'єкт дослідження – двосекційна будівля з секціями різної поверховості.

Предмет дослідження - напруження і деформації у конструкціях секцій будинку.

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для досягнення поставленої мети було застосовано числове моделювання – створено реалістичну скінчено-елементну модель з врахуванням реальних ґрунтових умов. Числове моделювання виконано в ПК ЛІРА, при цьому ґрунтовий масив моделювався об'ємними скінченими елементами з використанням пружної моделі ґрунту. Для порівняння було визначено напружено-деформований стан кожної секції окремо (ізолювана модель) та для двосекційної будівлі (інтегрована система). Реалізація розрахункового сценарію:

- Задача 1 - ізолювана взаємодія секції №1 (вища частина двосекційного будинку) з ґрунтовою основою;
- Задача 2 - ізолювана взаємодія секції №2 (нижча частина двосекційного будинку) з ґрунтовою основою;
- Задача 3 - спільна робота обох секцій двосекційного будинку з ґрунтовою основою, враховуючи їх взаємний вплив.

1. Напружено-деформований стан секції №1 будинку.

Постановка задач (рис. 1) полягала у

числовому моделюванні взаємодії з ґрунтом секції №1, яка розглядалася ізольовано.

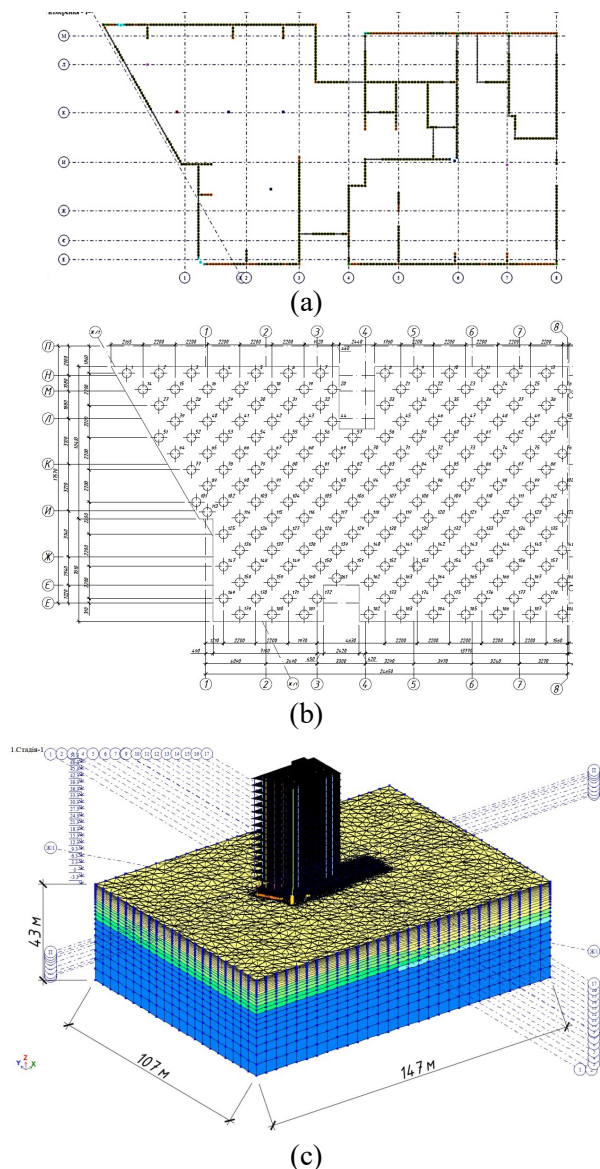


Рис.1. Задача №1: (а) – план вертикальних несучих елементів; (б) – план фундаментів; (с) – СЕ-модель.

Fig.1. Scenario 1: (a) – vertical load-bearing elements plan; (b) – foundation plan; (c) – FE-model.

Ця секція має 16 надземних поверхів та асиметричну геометрію в плані. Ядро жорсткості секції розташовано з ексцентриситетом від геометричного центру секції. Фундаменти будинку – пальові, із буроін'єкційних паль, об'єднаних суцільним плитним ростверком.

Якщо аналізувати вертикальні переміщення для центрального

поздовжнього розрізу будинку (рис. 2(a)), то для секції №1 ізополі вертикальних переміщень варіюються від -6 см (максимальне осідання/ущільнення ґрунту під центром фундаменту) до 0 на периферії, поза межами «зони впливу». Максимальні вертикальні переміщення зосереджені безпосередньо під фундаментною плитою-ростверком, зменшуючись із глибиною та відстанню від споруди.

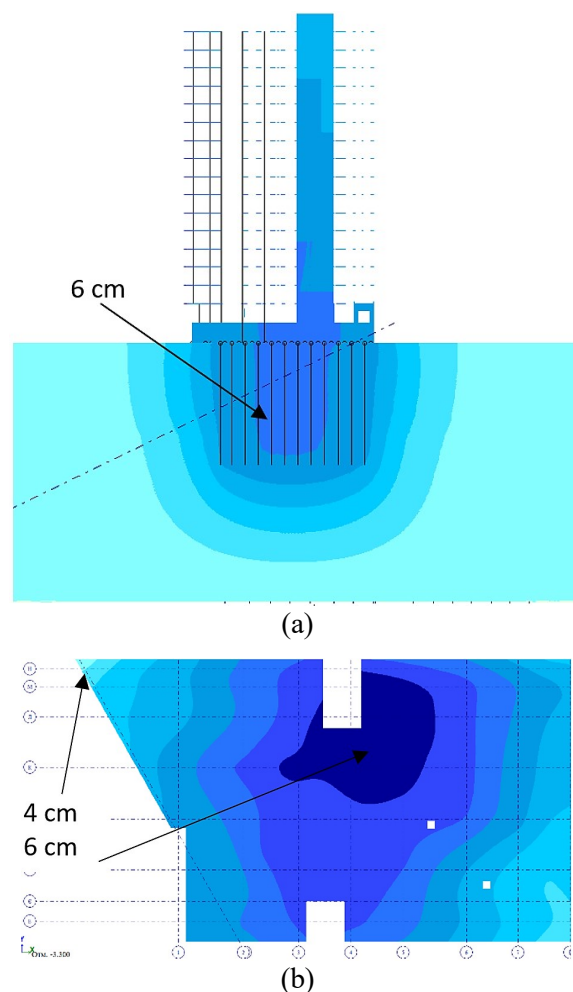


Рис.2. Вертикальні переміщення, см: (а) – для центрального поздовжнього перерізу секції; (б) – для ростверку.

Fig.2. Vertical strains, cm: (a) – for central cross-section, (b) – for foundation.

На рис. 2(b) наведено ізополі осідання фундаментів секцій. Для вищої секції, яка розглядалася ізольовано, осідання фундаменту очікується в діапазоні 4...6 см. Зона з максимальними значенням знаходиться під ядром жорсткості, тобто має зміщення вгору, що свідчить про виникнення крену секції.

Ізополя додаткових напружень в ґрунті (рис. 3(a)) для вищої секції, якщо її розглядати ізольовано, показали, що зона максимальних стискаючих напружень (близько 150 кПа) розташована у ґрунті на рівні підшви паль.

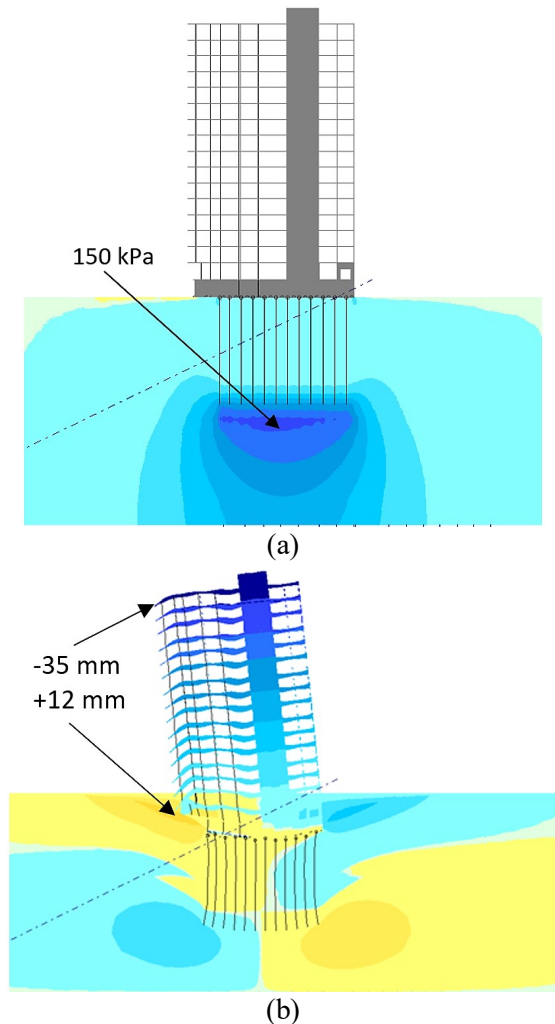


Рис.3. Задача 1: (a) – додаткові напруження, кПа; (b) – горизонтальні переміщення, мм.

Fig.3. Scenario 1: (a) – additional vertical stress, kPa, (b) – horizontal strains, mm.

Це свідчить про те, що основна частина навантаження ефективно передається на глибинні шари палями, і фундамент працює з домінуванням пальнової складової. Частина навантаження (близько 15%) передається безпосередньо через підшви ростверку на ґрунт, що створює широку зону напружень із розсіюванням в сторони.

Горизонтальні переміщення будинку та ґрунтового масиву по осі X (рис. 3(b)) для вищої секції варіюються від -35 мм (в

© С.Задачаина, В.Жук, О.Кашоїда, О.Гаврилюк.

Опубліковано Київським національним університетом будівництва і архітектури

одному напрямку) до 12 мм (у протилежному напрямку). Зафіксовано закручування секції, яке обумовлено асиметричною формою в плані та впливом ексцентриситету навантаження.

2. Напружено-деформований стан секції №2.

Друга постановка задач (рис. 4) полягала у числовому моделюванні взаємодії з ґрунтом секції №2, коли секція розглядалася також ізольовано.

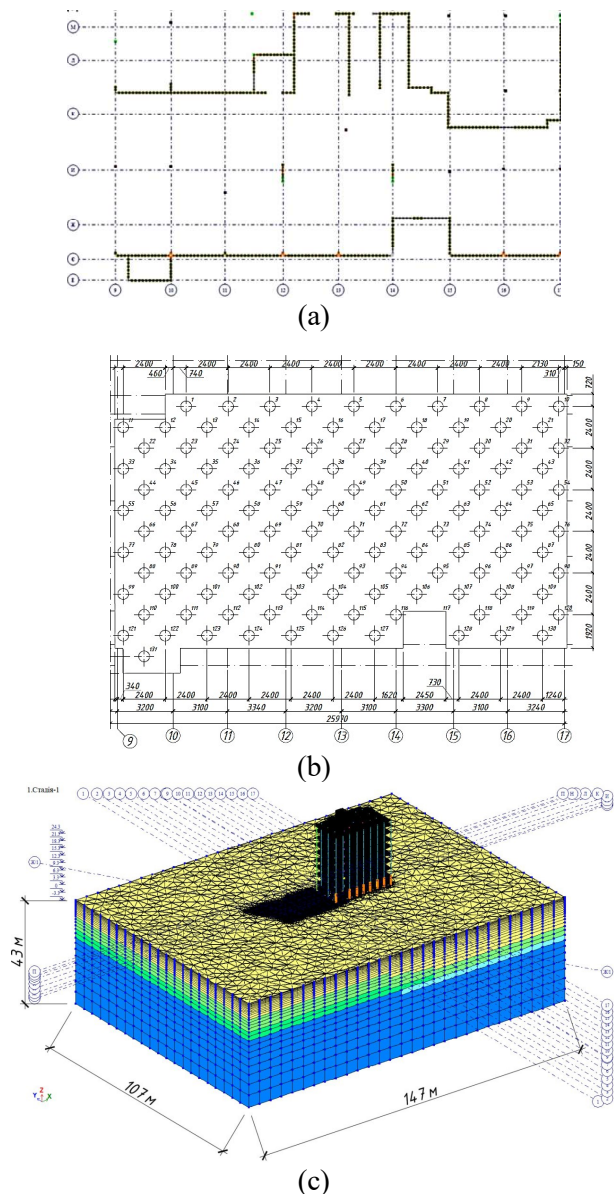


Рис.4. Задача №2: (a) – план вертикальних несучих елементів; (b) – план фундаментів; (c) – SE-модель.

Fig.4. Scenario 2: (a) – vertical load-bearing elements plan; (b) – foundation plan; (c) – FE-model.

Ця секція є меншою за поверховістю. В плані вона є більш симетричною, але для неї також характерне зміщення ядра жорсткості вправо-вгору (рис. 4(a)).

Для секції №2, яка розглядалася ізольовано ізоплюя вертикальних переміщень змінюються від -3 см (максимальне осідання ґрунту) до 0 на периферії (рис. 5(a)). Зона максимальних переміщень зосереджена безпосередньо під ростверком і в межах ґрунто-пального масиву.

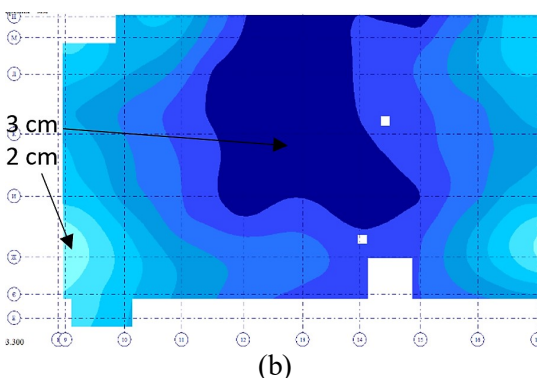
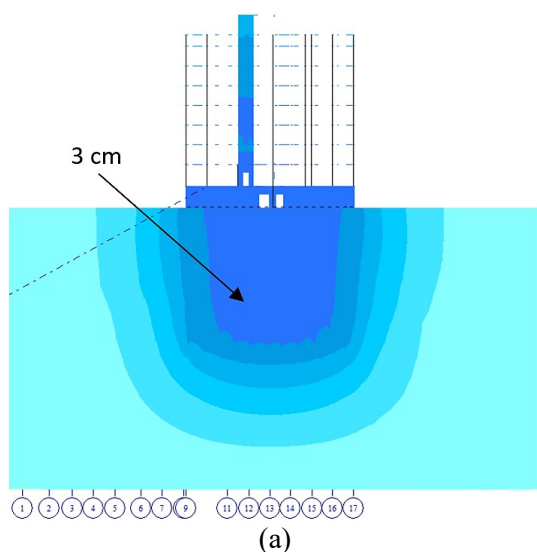


Рис.5. Вертикальні переміщення, см: (a) – для центрального поздовжнього перерізу секції; (b) – для ростверку.

Fig.5. Vertical strains, cm: (a) – for central cross-section, (b) – for foundation.

Для малоповерхової секції, яка здійснює менший тиск на ґрунтову основу, осідання фундаменту очікується в діапазоні 2...3 см. Зона з максимальними значеннями знаходиться під ядром жорсткості, тобто також має зміщення вгору (рис. 5(b)).

Якщо аналізувати додаткові напруження в ґрунті (рис. 6(a)), то для малоповерхової секції бачимо утворення зони максимальних напружень на рівні низу пальового фундаменту - величина додаткових напружень складає близько 80 кПа.

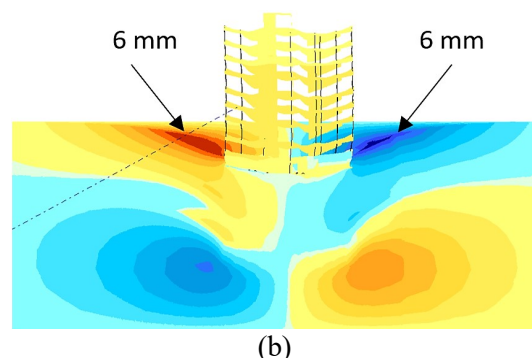
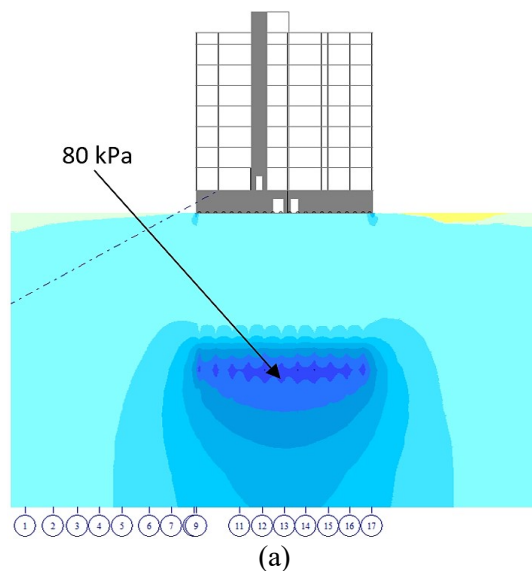


Рис.6. Задача 2: (a) – додаткові напруження, кПа; (b) – горизонтальні переміщення, мм.

Fig.6. Scenario 2: (a) – additional vertical stress, kPa, (b) – horizontal strains, mm.

Для меншої секції ізоплюя горизонтальних переміщень (рис. 6.(b)) показують наявність двох зон локальних зсувів ґрунту, проте горизонтальні переміщення відносно невеликі - 5...6 мм в обох напрямках. Сама секція має практично вертикальне осідання.

3. Напружено-деформований стан двосекційного будинку.

Третя постановка задач (рис. 7-8) полягала у числовому моделюванні взаємодії з ґрунтом двосекційного будинку,

коли враховувався вплив секцій.

Для двосекційного будинку бачимо утворення спільної воронки осідання, спільної зони впливу, яка охоплює фундаменти обох секцій (рис. 7(b)). При цьому зона максимальних значень вертикальних переміщень зосереджена під більш важкою секцією. Тобто воронка осідання має несиметричну форму через різноповерховість секцій.

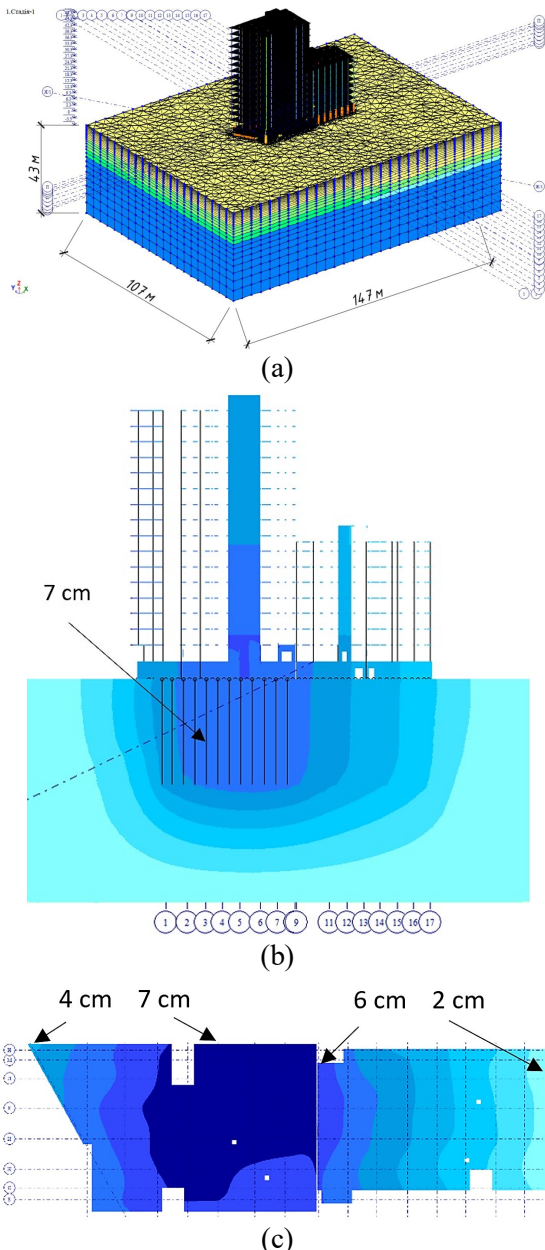


Рис.7. Задача №3: (а) – СЕ-модель; (б) – вертикальні переміщення, см; (с) – осідання фундаментів, см.
 Fig.7. Scenario 3: (a) – FE-model; (b) – vertical strains, cm; (c) – foundation settlements, cm.

Секції осідають спільно, формуючи єдину несиметричну воронку осідання. Максимальне значення осідання секції №1 зросло з 6 см (при розрахунку окремо) до 7 см (у складі двосекційного будинку). Це означає, що секція №2 (хоча й менша за поверховістю) додає навантаження і збільшує осідання сусідньої, більш навантаженої секції. Для секції №2: максимальне осідання зросло з 3 см (при розрахунку окремо) до 6 см (рис. 7(c)). При цьому зона максимальних значень перемістилася до деформаційного шва між секціями. Це свідчить про виникнення крену секції.

Ізополя вертикальних напружень показують формування єдиної зони напружень під фундаментами обох секцій, яка має несиметричну форму з концентрацією напружень під секцією №1 (рис. 8(a)).

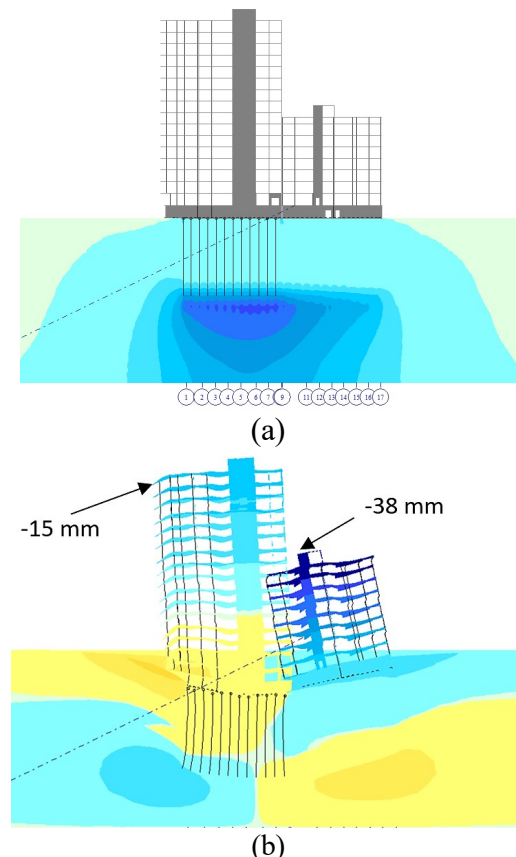


Рис.8. Вертикальні переміщення, см: (а) – додаткові напруження, кПа; (б) – для ростверку.
 Fig.8. Vertical strains, cm: (a) – additional vertical stress, kPa, (b) – for foundation.

Вища секція створює значно більший тиск на ґрунтову основу та має глибшу зону впливу, ніж нижча секція.

Горизонтальні переміщення (рис. 8(b)) за результатами спільної роботи секцій показали, що нахил вищої секції залишається , але горизонтальне переміщення становить 14 мм, що є меншим за нахил при окремому розрахунку (тоді було 35 мм). Це вказує на зменшення обертання секції №1 під впливом секції-сусіда та їх спільної роботи з ґрунтом. Для малоповерхової секції зафіксовано горизонтальне переміщення, яке сягає 38 мм.

4. Аналіз результатів дослідження.

Якщо застосувати єдину шкалу (рис. 9) для всіх результатів розрахунків - для розгляду взаємодії ізольованих секцій з ґрунтом та двосекційного будинку, то можна побачити ефект впливу урахування їх спільної роботи на формування напружень і виникнення деформацій.

Малоповерхова секція №2, коли розглядається ізольовано, має більш рівномірний характер деформування. При врахуванні спільної роботи секцій з ґрунтом формується загальна воронка осідання. Як наслідок - спостерігається ефект «затягування» малоповерхової секції у спільну воронку, виникає крен (рис. 9(a)).

Вплив на вищу секцію також відчутний. Наявність секції №2 (правої) додає навантаження і впливає на розміри і форму спільної воронки осідання. В результаті збільшилося осідання високої секції, також відбулося нахилання її в бік сусідньої секції.

Аналізуючи осідання фундаментів (рис. 9(b)), можна побачити, що ізольовані секції мають більш рівномірний характер деформування. Двосекційний будинок (з несиметричною геометрією та різною поверховістю секцій) формує спільну воронку осідання, виникає зустрічний нахил фундаментних конструкцій.

Висновок: сумісна робота призвела до збільшення осідання обох секцій за рахунок спільного затягування у воронку осідання.

На рис. 9(с) застосовано єдину шкалу для

додаткових напружень в ґрунті. Можна побачити, що зони концентрації напружень при спільній роботі секцій збільшуються як в розмірах так і за величиною напружень, що особливо важливо для малоповерхової секції, де фіксуються значні зміни характеру напружень.

Порівнюючи результати розрахунків для горизонтальних переміщень (рис. 9(d)), можна зробити висновок: менша секція зазнала значного горизонтального нахилу в бік центру воронки осідання. Вища секція зазнала горизонтального переміщення у протилежному напрямку порівняно із окремим розрахунком, що свідчить про ефект закручування (торсіонний ефект) системи при зустрічному крені секцій у спільній воронці осідання. Це спрацювало як позитивний ефект, зменшивши нахил цієї секції.

Також було проаналізовано зусилля в надфундаментній частині – в вертикальних несучих елементах нижнього поверху. Для цього було обрано по два пілона в кожній секції (рис. 10). Спостерігається збільшення поздовжнього зусилля при спільній роботі секцій: для вищої секції - на 2% у зовнішньому пілоні і на 5% у внутрішньому пілоні; для малоповерхової секції - на 8% у зовнішньому пілоні та на 22% у внутрішньому пілоні.

Результати порівняння доводять, що врахування спільної роботи секцій є обов'язковим при проектуванні несучих елементів надземної частини.

Для аналізу зусиль в оголовках паль було обрано характерні палі по контуру та в центрі кожної секції. Очікуване довантаження крайніх та центральних паль секцій склало від 10 до 200 кН. Це свідчить про суттєвий перерозподіл навантаження на палі при спільній роботі секцій порівняно з ізольованим розглядом.

Аналіз згинальних моментів в ростверках підтверджує перерозподіл внутрішніх зусиль в конструкціях внаслідок виникнення зустрічного крену секцій. Зафіксовано кількісну зміну значення згинальних моментів у ростверку в залежності від варіанту моделювання. Розташування зон

характеризується ділянками поблизу зони градієнту деформацій спільної воронки деформаційного шва між секціями, а також осідання.

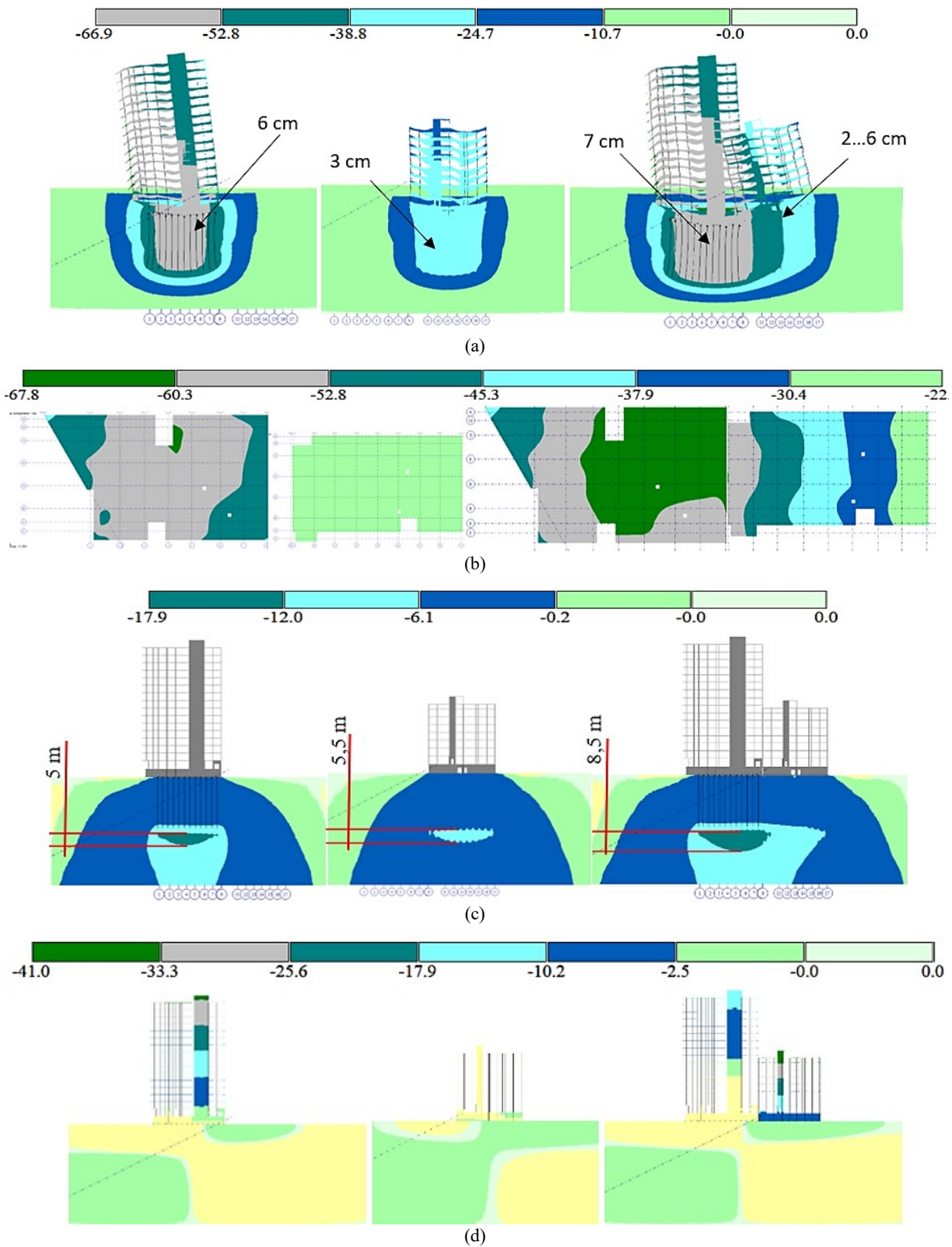


Рис.9. Порівняння результатів: (а) – вертикальні переміщення, мм; (б) – осідання фундаментів, мм, (с) – додаткові напруження, т/м²; (д) горизонтальні переміщення, мм.

Fig.9. Results comparison: (a) - vertical strains, mm; (b) – foundation settlements, mm; (c) – vertical stress, t/m²; (d) – horizontal strains, mm.

© Є.Задача, В.Жук, О.Кашиода, О.Гаврилюк.

Опубліковано Київським національним університетом будівництва і архітектури

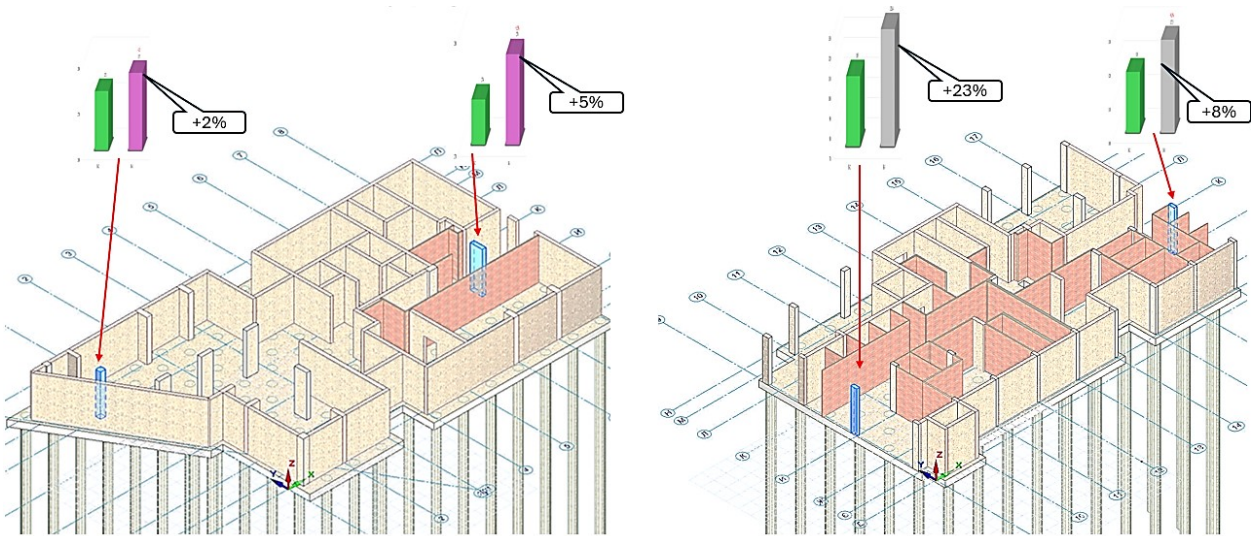


Рис.10. Кількісне порівняння поздовжніх зусиль в пілонах в залежності від методу розрахунку, %.
Fig.10. A quantitative comparison of stresses in columns based on different calculation methods, %.

ВИСНОВКИ

За результатами проведеного дослідження було зафіксовано наступні ефекти:

- формування єдиної, несиметричної зони напружень з концентрацією напружень під більш важкою секцією;
- секції осідають спільно, формуючи єдину несиметричну воронку осідання;
- суттєве збільшення осідання обох секцій порівняно з розрахунком їх окремо;
- ефект «затягування» малоповерхової секції у спільну воронку, що призводить до її додаткового осідання та крену;
- зони концентрації напружень в ґрунті при спільній роботі збільшуються як в розмірах, так і за величиною.

Результати дослідження підтвердили важливість комплексного розгляду багатосекційної будівлі як єдиної системи «основа - фундамент - будівля», а не як окремі незалежні секції. Ігнорування цієї взаємодії призводить до неточних розрахунків напружено-деформованого стану елементів системи.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Poulos, H.G. Analysis of Foundation Settlement Interaction among Multiple High-

Rise Buildings. *Geotech Geol Eng* 41, 2815–2831 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02429-1>

2. Mohamed Elsharawy (2024). The Effect of 3D Interference of Shallow Foundation on Settlement and Its Impacts on Building Structures. *Civil Engineering and Architecture*, 12(3A), 2074 - 2090. <https://doi.org/10.13189/cea.2024.121311>
3. Gazetas, George and Mylonakis, George. (2001). Soil-Structure Interaction Effects on Elastic and Inelastic Structures. *International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*. 2. <https://scholarsmine.mst.edu/icrageesd/04icrageesd/session13/2>
4. Shakib, Hamzeh & Atefatdoost, Gholam. (2011). Effect of Soil-Structure Interaction on Torsional Response of Asymmetric Wall Type Systems. *Procedia Engineering*. 14. 1729-1736. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.217>
5. Tsige, Damtew & Genemo, Dekebi & Boru, Yada & Dessisa, Alemineh & Mezmur, Tigist & Tamiru, Mulatu. (2023). Interference Effect of Closely Spaced Foundation Footing on Settlement Variation. *Advances in Civil Engineering*. 2023. <https://doi.org/10.1155/2023/7464998>

Stress-strain state of a two-section building considering the combined behavior of sections with different numbers of stories

*Yevheniia ZADACHYNA
Veronika ZHUK
Ostap KASHOIDA
Oleksandr GAVRYLIUK*

Стаття надійшла до видання:
16.04.2026.

Стаття прийнята до друку після рецензування:
08.05.2026.

Стаття опублікована:
30.05.2026

Abstract. Improving design methods and increasing the reliability of modern multi-story structures is impossible without considering soil-structure interaction. The formation of the stress-strain state (SSS) within the "soil-foundation-building" system is particularly relevant for multi-section buildings, where diverse structural solutions and uneven loading can induce complex spatial effects. The relevance of this study stems from the fact that during the design of multi-section buildings, the specific characteristics of their combined behavior within the "soil-foundation-building" system are often neglected, potentially leading to inaccurate SSS determination and the occurrence of non-uniform deformations.

The aim of the study was to evaluate the stress redistribution caused by the mutual influence of building sections and to determine the importance of considering these sections as a unified whole rather than as separate units.

A fundamentally different distribution of the structural stress-strain state was established through numerical modeling that accounts for the spatial interaction of the sections. The results demonstrate a qualitative difference in the SSS of a two-section building compared to traditional analysis of isolated sections characterized by varying numbers of stories and asymmetric floor plans.

The research findings are significant for engineering practice, particularly in the design of multi-section buildings. Torsional effects (twisting) were identified in the taller section, caused by its asymmetric plan shape and the spatial redistribution of forces in the load-bearing elements. Additionally, a "draw-in" effect was established for the shorter section into a shared settlement crater (subsidence cone), leading to additional horizontal displacements and tilting (inclination) relative to the vertical axis.

Keywords. Stress-strain state (SSS), numerical simulation, LIRA-SAPR software, soil foundation, mutual influence of sections.