

УДК 624.131:624.15

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.140723.94.960

НАТУРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ОСІДАНЬ ПЛИТНИХ ФУНДАМЕНТІВ ДВОСЕКЦІЙНОЇ БАГАТОПОВЕРХОВОЇ БУДІВЛІ НА СЛАБКИХ ВОДОНАСИЧЕНИХ ҐРУНТАХ

САМОРОДОВ О. В.^{1*}, *докт. техн. наук, проф.*,
ТАБАЧНИКОВ С. В.², *канд. техн. наук, доц.*,
ЄСАКОВА С. В.³, *канд. техн. наук, доц.*,
КРОТОВ С. В.⁴, *канд. техн. наук, доц.*

^{1*} Кафедра геотехніки, підземних споруд та гідротехнічного будівництва, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, 61002, Харків, Україна, тел. +38 (050) 301-76-99, e-mail: osamorodov@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-4395-9417

² Кафедра геотехніки, підземних споруд та гідротехнічного будівництва, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, 61002, Харків, Україна, тел. +38 (093) 253-02-86, e-mail: s.v.tabachnikov@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-2619-8612

³ Кафедра геотехніки, підземних споруд та гідротехнічного будівництва, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, 61002, Харків, Україна, тел. +38 (050) 908-68-62, e-mail: esakova@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-6598-5929

⁴ Кафедра геотехніки, підземних споруд та гідротехнічного будівництва, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, 61002, Харків, Україна, тел. +38 (050) 401-41-56, e-mail: krotov.project@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7588-1370

Анотація. Постановка проблеми. У галузі будівництва багатоповерхових і висотних будівель при значних навантаженнях на основу, особливо за наявності зверху слабких водонасичених ґрунтів, як правило, застосовують пально-плитні фундаменти для виконання вимог нормативного документа [1] за гранично допустимими деформаціями. Можливість застосування у цьому випадку плитних фундаментів повинна бути підтверджена розрахунками з науково-технічним обґрунтуванням прийнятої моделі ґрунтової основи та її параметрів. **Мета статті** – обґрунтування застосування моделі ґрунтової основи у вигляді лінійно-деформованого шару скінченної ширини та її параметрів на підставі спостережень за осіданнями поряд розташованих багатоповерхових будівель на плитних фундаментах у процесі будівництва та порівняння фактичних значень деформацій фундаментів із розрахунковими. **Висновки.** Результати досліджень підтвердили можливість застосування моделі ґрунтової основи у вигляді лінійно-деформованого шару скінченної ширини для прогнозування деформацій рівноповерхових секційних будівель на великорозмірних плитних фундаментах, в основі яких із поверхні залягають слабкі водонасичені піщані ґрунти. Слід зазначити, що у даному випадку перевищення фактичних осідань будівель над розрахунковими пов'язане з недоврахуванням процесів фільтраційної консолідації та механічної суфозії піщаних частинок в шар щелевеної подушки, що надалі може бути враховано зниженням модулів деформації ґрунтів у даній моделі ґрунтової основи.

Ключові слова: ґрунтова основа; секційна будівля; плитний фундамент; моделювання; модуль деформації; натурні спостереження; осідання; крен

FIELD STUDIES OF SLAB FOUNDATIONS' SETTLEMENTS FOR TWO-SECTION MULTI-STOREY BUILDING ON WEAK WATER-SATURATED SOILS

SAMORODOV O.V.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
TABACHNIKOV S.V.², *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
YESAKOVA S.V.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
KROTOV O.V.⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

^{1*} Department of Geotechnics, Underground Structures and Hydrotechnical Construction, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 17, Marshal Bazhanov St., Kharkiv, 61002, Ukraine, tel. +38 (050) 301-76-99, e-mail: osamorodov@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-4395-9417

²Department of Geotechnics, Underground Structures and Hydrotechnical Construction, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 17, Marshal Bazhanov St., Kharkiv, 61002, Ukraine, tel. +38 (093) 253-02-86, e-mail: s.v.tabachnikov@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-2619-8612

³Department of Geotechnics, Underground Structures and Hydrotechnical Construction, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 17, Marshal Bazhanov St., Kharkiv, 61002, Ukraine, tel. +38 (050) 908-68-62, e-mail: esakova@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-6598-5929

⁴Department of Geotechnics, Underground Structures and Hydrotechnical Construction, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 17, Marshal Bazhanov St., Kharkiv, 61002, Ukraine, tel. +38 (050) 401-41-56, e-mail: krotov.project@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7588-1370

Abstract. Problem statement. In the construction of multi-storey and high-rise buildings with significant loads on the foundation, especially in the presence of weak water-saturated soils from above, pile and slab foundations are usually used to meet the requirements of the building code [1] on the maximum permissible deformations. The possibility of using slab foundations in this case must be confirmed by calculations with a scientific and technical justification of the accepted model of the soil foundation and its parameters. *The purpose of the article* is to substantiate the application of the model of the soil base in the form of finite width elastic layer and its parameters based on observations of the subsidence of adjacent multi-story buildings on slab foundations during the construction process and to compare the actual values of foundation deformations with calculated. **Conclusions.** The research results confirmed the possibility of applying the model of the soil base in the form of finite width elastic layer for predicting the deformations of equally story sectional buildings on large-sized slab foundations, the basis of which are weak water-saturated sandy soils from the surface. However, it should be noted that in this case, the excess of the actual settlement of buildings over the estimated is due to the failure to take into account the processes of filtration consolidation and mechanical suffusion of sand particles into the crushed stone bed, which can further be taken into account by reducing of soil deformation modules in this model of the soil base.

Keywords: *soil base; sectional building; slab foundation; simulation; modulus of deformation; field surveys; settlement; tilt*

Постановка проблеми. У галузі будівництва багатоповерхових і висотних будівель при значних навантаженнях на основу, особливо за наявності зверху слабких водонасичених ґрунтів, як правило, застосовують пальово-плитні фундаменти для виконання вимог нормативного документа [1] за гранично допустимими деформаціями. Можливість застосування у цьому випадку плитних фундаментів повинна бути підтверджена розрахунками з науково-технічним обґрунтуванням прийнятої моделі ґрунтової основи та її параметрів.

Мета статті – обґрунтування застосування моделі ґрунтової основи у вигляді лінійно-деформованого шару скінченної ширини та її параметрів на підставі спостережень за осіданнями поряд розташованих багатоповерхових будівель на плитних фундаментах у процесі будівництва та порівняння фактичних значень деформацій фундаментів із розрахунковими.

Матеріали і методи досліджень. Об'єктом дослідження стали деформації ґрунтової основи плитних фундаментів поряд розташованих житлових шістнадцятиповерхових будівель із

підземним та технічним поверхами. Район будівництва – Україна, м. Харків, Основ'янський район, вул. Лисаветинська, 2Б. Загальний вигляд розташування будівель показаний на рисунку 1 (дослідна будівля 7, секції 1, 2).

Секції будівлі подібні, а в плані кожна секція – це дзеркальне відображення поряд розташованої.

Конструктивна схема будівель – безкаркасна. Несучі елементи будівель такі:

- цегляні стіни із силікатної цегли товщиною 510 мм та 380 мм;
- збірні залізобетонні перекриття, виконані з багатопустотних залізобетонних плит товщиною 220 мм;
- стіни підвалу збірні з бетонних блоків товщиною 500 мм.

Схема розташування свердловин наведена на рисунку 2.

Сталий рівень підземних вод за період досліджень (червень 2020 р.) зафіксовано на глибинах: 1,8...3,3 м (абс. відмітки 101,51–102,92 м). Територія підтоплена. У паводковий період і під час інтенсивних атмосферних опадів рівень підземних вод може досягати відміток близьких до поверхні землі.

Опис та фізико-механічні властивості ґрунтів наведені в таблицях 1 і 2 (значення питомої ваги ґрунту, питомої ваги водонасиченого ґрунту, модуля деформації, кута внутрішнього тертя та питомого зчеплення подані як розрахункові за

довірчої ймовірності 0,85. Додатково вказано штамповий модуль деформації E верхньої зони пісків ПГЕ-2, що ущільнені втрамбуванням щебеню катком та утворенням щебеневої подушки товщиною 200 мм).



Рис. 1. Розташування дослідної будівлі 7 (секції 1 та 2) у процесі зведення

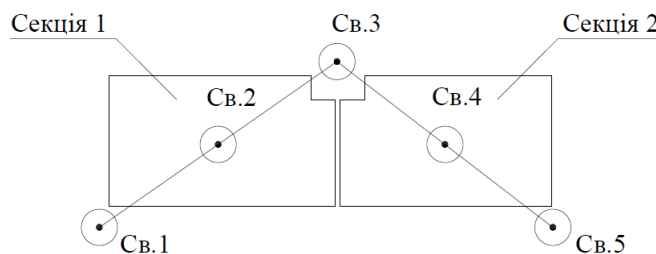


Рис. 2. Схема розташування свердловин

Таблиця 1

Найменування та опис ґрунтів

Номер ПГЕ	Найменування та опис ґрунтів
ПГЕ-1	Насипні ґрунти – суглинки, піски з включенням будівельного сміття, відсипані сухим способом, характеризуються неоднорідним складом, нерівномірною щільністю та стисливістю, із залишками похованих фундаментів, злежані та незлежані, товщина шару до 2,6 м.
ПГЕ-2	Піски жовто-сірі, сірі дрібні, від вологих до насичених водою, середньої щільності (зверху пухкі), однорідні, з прошарками суглинків та супісків, товщина шару до 5,6 м.
ПГЕ-3	Суглинки зеленувато-сірі, тугопластичні, у водонасиченому стані – м'якопластичні, в підшві з лінзами пісків пилюватих, товщина шару до 2,9 м.
ПГЕ-5a	Піски сірі, зеленувато-сірі, голубувато-сірі, дрібні, насичені водою, товщина шару до 5,0 м.
ПГЕ-8	Глини голубувато-сірі, від напівтвердої до тугопластичної консистенції, з прошарками піщаників, товщина шару до 11,8 м.

Таблиця 2

Фізико-механічні властивості ґрунтів

Характеристика	Умовні позначення	Одиниці вимірювання	Шар				
			1 – насипний ґрунт	2 – піски дрібні, від вологих до насичених водою	3 – суглинки тугопластичні, у водонасиченому стані м'якопластичні	5а – піски дрібні, водонасичені, щільні, неоднорідні	8 – глини від напівтвердої до тугопластичної консистенції
Питома вага ґрунту	γ	кН/м ³	–	18,88	19,40	20,23	16,74
Питома вага водонасиченого ґрунту	γ_{sat}	кН/м ³	–	19,45	19,60	19,22	16,88
Питома вага частин ґрунту	γ_s	кН/м ³	–	26,09	26,68	20,15	26,74
Питома вага зваженого у воді ґрунту	γ_{sb}	кН/м ³	–	9,97	9,99	10,65	7,47
Природна вологість	W	д.ед.	–	0,19	0,22	0,19	0,38
Коефіцієнт пористості	e	д.ед.	–	0,63	0,68	0,54	1,06
Питоме зчеплення ґрунту	c	кПа	–	2	23	4	37
Кут внутрішнього тертя	φ	град.	–	33	18	36	17
Модуль деформацій у природному/ водонасиченому станах	E	МПа	–	-/28(9*)	-/15	-/38	-/13
Показник плинності водонасиченого ґрунту	I_L	д.ед.	–	–	0,60	–	0,24
Число пластичності	I_p	д.ед.	–	–	0,11	–	0,28

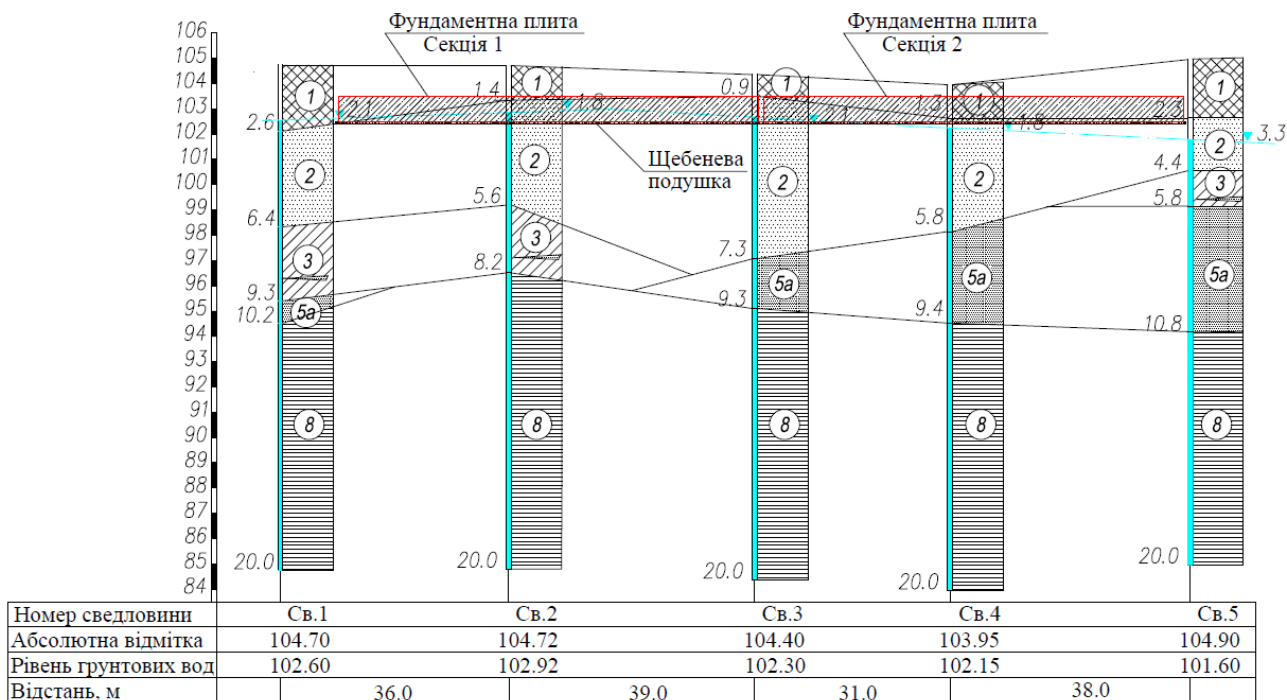


Рис. 3. Інженерно-геологічний розріз 1–5



Рис. 4. Етап підготовки основ фундаментів

В якості фундаментів житлових будівель прийняті залізобетонні фундаментні плити товщиною 1 000 мм. Низ фундаментних плит прийнято на абс. відмітці 102,8 м.

Інженерно-геологічний розріз з умовним розташуванням фундаментних плит показано на рисунку 3.

Грунтовою основою фундаментів є ІГЕ-2 – піски дрібні, від вологих до насичених водою, середньої щільності з модулем деформації у водонасиченому стані – $E = 28,0$ МПа (згідно зі звітом з інженерно-геологічних вишукувань).

Однак, на підставі додатково проведених штампових випробувань покрівлі пісків ІГЕ-2, що були ущільнені втрамбуванням щебеню катком з утворенням щебеневої подушки товщиною 200 мм, – загальний модуль деформації дорівнює $E = 9,0$ МПа, що й прийнято у розрахунках. На рисунку 4 наведено фото підготовки основи фундаментів.

Результати дослідження. Максимальний середній тиск під фундаментною плитою тільки від власної ваги зведених конструкцій без уведення підвищувальних коефіцієнтів не перевищує розрахункового опору ґрунту основи: $p = 230,02$ кПа $< R = 388$ кПа, тому теоретичні розрахунки осідання будівлі проводилися з використанням моделі лінійно-деформованого середовища з обмеженням стисливої товщі та горизонтальних переміщень у плані (модель лінійно-деформованого шару скінченної ширини) [2; 4].

Згідно з розрахунками [3] стислива товща основи прийнята $H_c = 9,5$ м за середнього тиску під подошвою фундаментної плити $p = 65,21$ кПа, що відповідає власній вазі конструкцій при трьох зведених поверхах; $H_c = 10,5$ м при $p = 98,55$ кПа (шість зведених поверхів), $H_c = 13,5$ м при $p = 153,21$ кПа (одинадцять зведених поверхів), $H_c = 18,0$ м при $p = 230,02$ кПа (сімнадцять зведених поверхів).

Моделювання системи основа–фундамент–будівля та результати розрахунків. Моделювання та розрахунок системи основи–фундамент–споруда виконано в програмному комплексі SOFiSTiK. Модель ґрунтової основи прийнята у вигляді лінійно-деформованого шару скінченної ширини. Потужність (товщина) шару обмежувалася величиною стисливої товщі для кожного етапу навантаження ґрунтової основи від збудованого будівельного об'єму. Граничні умови в плані для ґрунтового масиву прийняті таким чином, щоб вплив жорстких горизонтальних в'язевих обмежень масиву був мінімальним: 120×80 м.

Фундаментна плита замодельована пластинчастими оболонковими елементами. Колони моделювались просторовими стрижнями; плити перекриття, стіни та пілони – пластинчастими оболонковими елементами.

На підставі обраних параметрів моделі та вихідної інформації виконано моделювання взаємодії будівель з указаною

моделлю основи. Чисельний розрахунок виконано методом скінченних елементів, що заснований на рішеннях теорії пружності.

Схематично розрахункова модель основа – фундамент – споруда показана на рисунку 5.

Деформована схема фундаментів двосекційної будівлі при завантаженні ґрунтової основи одразу двома секціями (миттєво-пружне рішення) із загальною стисливою товщею $H_c = 18.0$ м при $p = 230,02$ кПа (сімнадцять зведених поверхів) наведена на рисунку 6.

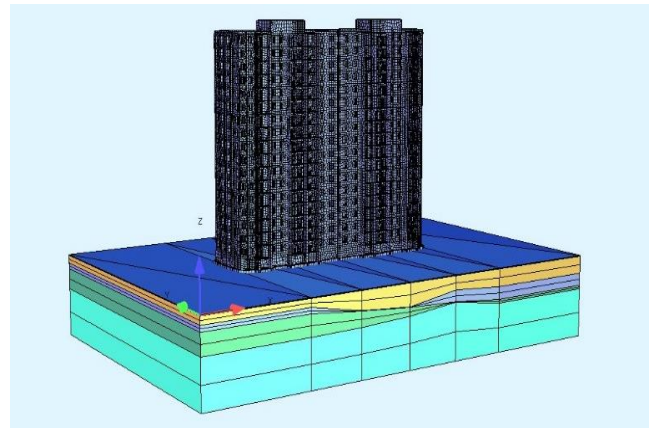


Рис. 5. Модель житлового комплексу у системі основа–фундамент–споруда у програмному комплексі SOFiSTiK

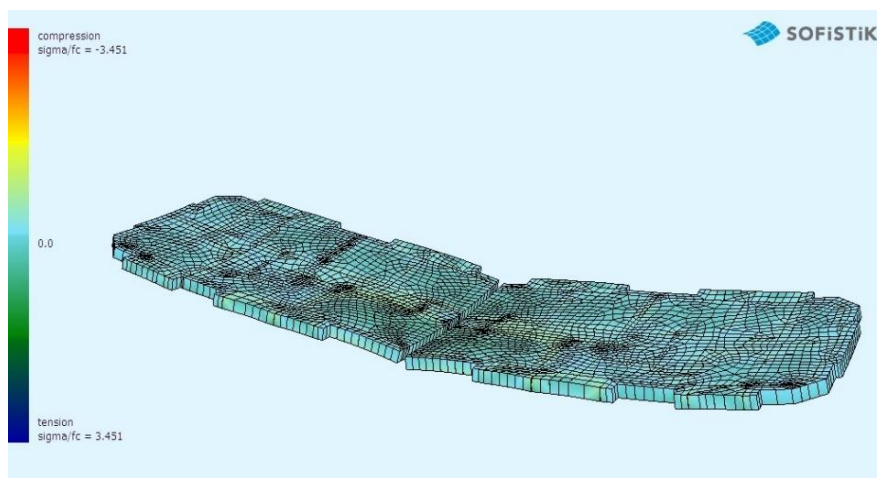


Рис. 6. Схема деформування фундаментних плит рівноповерхових будівель

Результати спостереження.

Спостереження за осіданнями будівлі проводилися в процесі будівництва методом високоточного нівелювання II класу. Визначено позначки осадових марок М.1, М.2, М.3, М.4, М.5, М.6, М.7 та М.8, що були закладені в рівні цокольного поверху обох секцій будівлі. У процесі будівництва виділено 6 етапів спостережень:

- 1-й етап – лютий 2021 року – влаштування цокольного поверху 2-ї секції та 3-го поверху 1-ї секції;
- 2-й етап – березень 2021 року - будівництво 3-го поверху 2-ї секції та 6-го поверху 1-ї секції;
- 3-й етап – червень 2021 року - будівництво 8-го поверху 2-ї секції та 11-го поверху 1-ї секції;

- 4-й етап – вересень 2021 року - будівництво 14-го поверху 2-ї секції та 17-го поверху 1-ї секції;
- 5-й етап – листопад 2021 року - будівництво 17-го поверху 2-ї секції та 17-го поверху 1-ї секції;
- 6-й етап – лютий 2022 року – спостереження при незмінному навантаженні за наявності 17 поверхів обох секцій 1- та 2-ї.

Для нівелювання використано нівелір Н-05 й інварну нівелірну рейку РН-05. Нівелювання виконане в прямому і зворотному напрямках шляхом суміщення. На кожній станції за спостереженнями основних і додаткових шкал обчислені перевищення a_z , a_n та їх різниця $h = a_z - a_n$, яка не перевищувала 0,7 мм. Для прямого і зворотного ходів по кожній секції (між суміжними реперами в ході) обчислені суми

перевищень прямого $[h]_п$ і зворотного $[h]_з$ ходів. Розбіжності f_x не перевищували $\pm 2,1$ мм (L – довжина ходу в км) за кількості станцій менше 15. Для точності підрахунків використано програму Microsoft Excel, а порівняння результатів проводилось у програмі ARMGEO. Геодезичні роботи та розрахунки виконані к. т. н., доц. Т. А. Наливайком.

На рисунках 7–8 наведено графіки значення фактичних і розрахункових осідань та кренів двох секцій будівлі від

контрольованих реальних навантажень у процесі будівництва (враховувалася тільки власна вага зведених конструкцій без підвищувальних коефіцієнтів).

На рисунку 9 показано вигляд деформаційного шва (на стику двох секцій) на завершальному етапі будівництва, що побічно вказує на відсутність локальних пошкоджень цегли на верхніх поверхах будівель біля деформаційного шва через «взаємонавали» будівель.

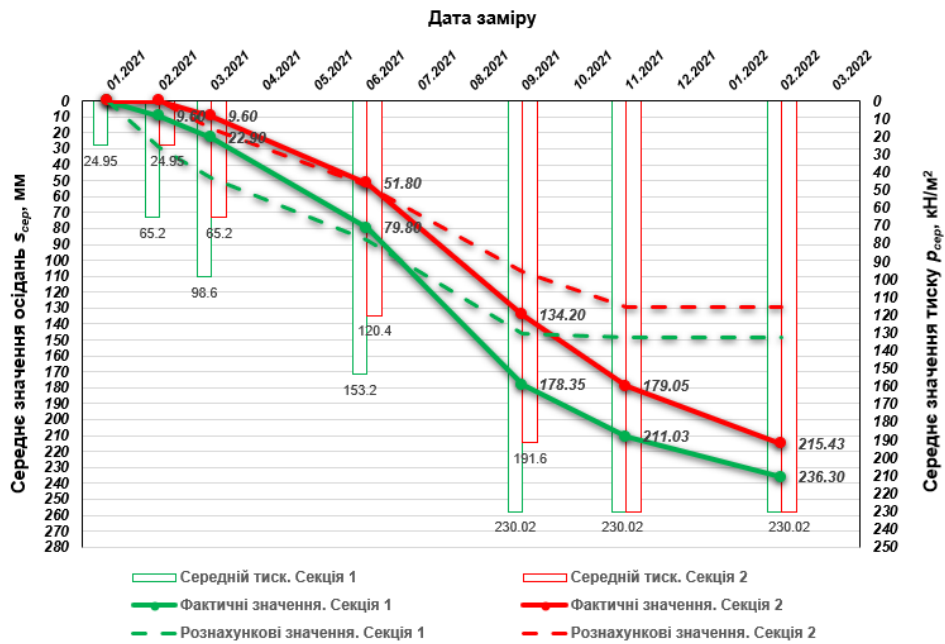


Рис. 7. Середні осідання секцій 1 та 2 від середнього тиску під підшовою плитою

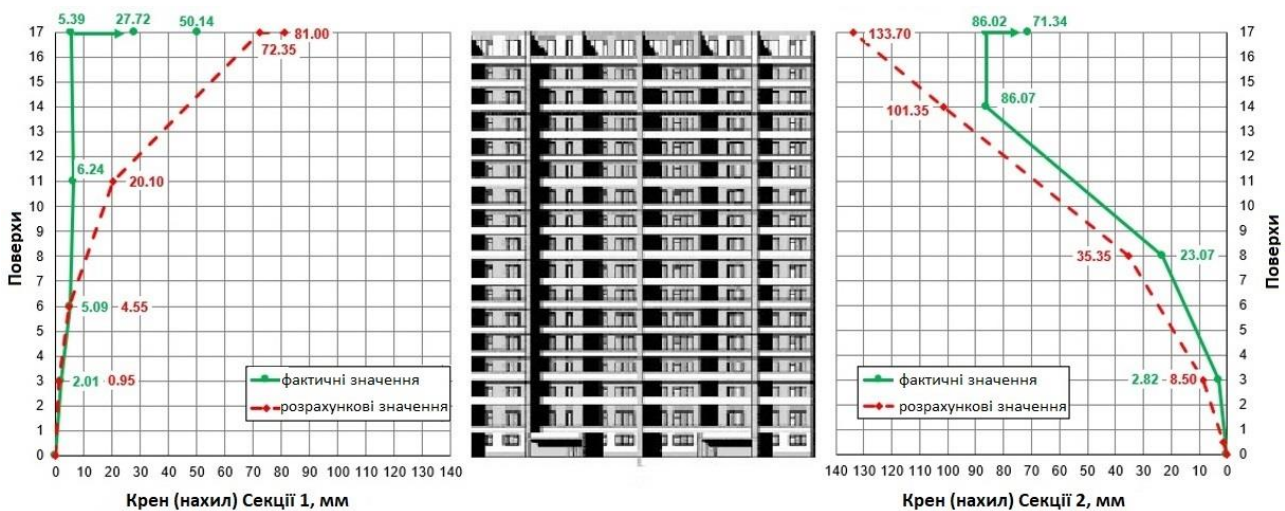


Рис. 8. Крени (нахили) секцій 1 та 2 по висоті уздовж будівлі від побудованих поверхів



Рис. 9. Деформаційний шов на завершальному етапі будівництва

Висновки.

Проведено спостереження за деформаціями ґрунтової основи двох поряд розташованих багатопверхових будівель на великорозмірних плитних фундаментах. Аналіз результатів досліджень дозволяє зробити такі висновки та рекомендації:

1. Підтверджується можливість застосування моделі ґрунтової основи у вигляді лінійно-деформованого шару скінченної ширини для прогнозування адекватних деформацій секційних будівель на великорозмірних плитних фундаментах, в основі яких із поверхні залягають слабкі водонасичені ґрунти.

2. У даному випадку перевищення фактичних осідань будівель над розрахунковими пов'язане саме з процесами фільтраційної консолідації та механічної суфозії піщаних частинок у шар щелевеної подушки, що надалі може бути враховано зниженням модулів деформації ґрунтів у даній моделі ґрунтової основи.

3. Розвиток кренів двох секцій будівлі у напрямку одна до одної підтверджує класичні теоретичні рішення механіки суцільного середовища, тобто накладання напружень (деформацій) за взаємного впливу. Однак із рисунка 8 чітко видно, що в процесі будівництва двох секцій з різницею у декілька поверхів (у даному випадку 4) основний вплив проявляється саме на завершальному етапі будівництва двох секцій, причому впливає саме секція 2, що побудована останньою. Тому аналіз фактичних кренів поряд розташованих фундаментів секційних будівель вказує на неможливість адекватного врахування взаємного впливу при різноповерхових будівлях із використанням моделі суцільного середовища із загальною стисловою товщею, що вимагає вдосконалення моделювання ґрунтової основи у системі основа–фундамент–споруда.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.2.1-10:2018. Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення. Київ : Мінрегіон України, ДП «Укрархбудінформ, 2018. 36 с.
2. Лучковский И. Я. Взаимодействие конструкций с основанием. Харків : ХДАГХ (Бібліотека журналу ITE), 2000. Т. 3. 264 с.
3. Самородов А. В. Проектирование эффективных комбинированных свайных и плитных фундаментов многоэтажных зданий : монография. Харьков : Типография «Мадрид», 2017. 204 с.
4. Тер-Мартirosян З. Г. Механика ґрунтов. Москва : АСВ, 2009. 309 с.

REFERENCES

1. DBN B.2.1-10:2018. *Osnovy i fundamenti budivel ta sporud. Osnovni polozhennya* [DBN B.2.1-10:2018. Bases and foundations of buildings and structures. Main provisions]. Kyiv : Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine, State Enterprise Ukrarkhbudinform, 2018, 36 p. (in Ukrainian).
2. Luchkovsky I.Ya. *Vzaimodeystviye konstruksiy s osnovaniyem* [The interaction of structures with the base]. Kharkiv : O.M. Beketov National University of Urban Economy (ITE journal), 2000, 264 p. (in Russian).
3. Samorodov A.V. *Proektirovaniye effektivnykh kombinirovannykh svaynykh i plitnykh fundamentov mnogoetazhnykh zdaniy* [Design of effective combined pile and raft foundations of multi-storey buildings : monograph]. Kharkiv : Madrid Printing House, 2017, 204 p. (in Russian).
4. Ter-Martirosyan Z.G. *Mekhanika gruntov* [Soil mechanics]. Moscow : ASV, 2009, 309 p. (in Russian).

Надійшла до редакції: 23.05.2023.