

Ідентифікація ґрунтових параметрів при розрахунку висотних будівель на пальових фундаментах

Василь Підлуцький¹, Василь Беган²

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

¹vasiliytsar@gmail.com, orcid.org/0000-0002-1936-3990

²began.vasya@gmail.com

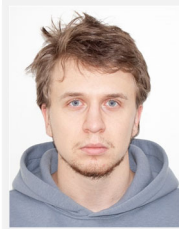
DOI: 10.32347/0475-1132.44.2022.19-26

Анотація. Представлено результати числового моделювання взаємодії буронабивних паль з ґрунтовим середовищем. Досліджено процес ідентифікації параметрів ґрунту відповідно до статичних випробувань паль. Виділено параметри ґрунту, які найбільше впливають на зміну графіка залежності осідання палі від навантаження.

Процес дослідження можна розділити на такі етапи: створення в ПК «ЛІРА-Сапр» числової моделі взаємодії палі з об'ємним ґрунтовим масивом. Масив прийнято розмірами 30х30х40 м, опираючись на дослідження науковців [1]. Паля задана стержневим скінченним елементом (довжина палі 30м, діаметр 0,82м). Масив заданий нелінійними скінченними елементами з характеристиками згідно даних по інженерно-геологічних досліджень. Навантаження прикладене кроковим методом (10 кроків) з максимальним значенням 600 тон-сил. Було розглянуто 4 варіанти об'ємного ґрунтового масиву з різними значеннями модуля пружності. У першому варіанті модуль пружності **без змін**, у другому збільшений у **2 рази**, у третьому в **3 рази** і у четвертому варіанті у **4 рази**. Модуль пружності збільшувався одночасно у всіх елементах ґрунтового масиву. Згідно розрахунку встановлено, що при модулі пружності, збільшеному в **4 рази**, графік залежності осідання від навантаження, є близьким до графіку натурних випробувань. Далі, було проведено ідентифікацію кута внутрішнього тертя, зі збільшеним модулем пружності в **4 рази**. Встановлено, що в моделі ґрунту з кутом внутрішнього тертя, взятим з коефіцієнтом **0,5**, графік осідання дослідної палі є дуже близьким до графіку випробувань. Тому, для розрахунку системи «основа – фундамент – надземні



Василь Підлуцький
доцент кафедри
геотехніки
к.т.н., доц.



Василь Беган
магістр кафедри
геотехніки

конструкції» прийнято збільшити модуль деформації у **4 рази**, а кут внутрішнього тертя взяти з коефіцієнтом **0,5**.

Виконано розрахунок системи «основа – фундамент – надземні конструкції» для висотної будівлі при ідентифікованих параметрах ґрунтів і при параметрах, які були до ідентифікації. Досліджено напружено-деформований стан фундаментних конструкцій для двох варіантів ґрунтових умов. Наведено перерозподіл зусиль у фундаментних конструкціях при обох варіантах параметрів ґрунтів.

Ключові слова. Ідентифікація ґрунтових параметрів, пальовий фундамент, чисельне моделювання, висотний будинок.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Останнім часом кількість висотних будівель активно зростає, а площа, доступна для будівництва, зменшується. Тому, для передачі навантажень від будівлі на основу використовують пальові фундаменти.

За допомогою програмних комплексів поставлена задача відтворити реальну картину перерозподілу зусиль у несучих конструкціях висотного будинку та отримати осідання фундаментів. Це можливо досягнути, розглядаючи роботу системи «основа – фундамент – надземні конструкції», опираючись на натурні випробування паль.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

У роботах багатьох науковців [1-3] показано необхідність ідентифікації параметрів ґрунтів. Переважно у публікаціях звучить те, що осідання фундаменту у ґрунтах з характеристиками, прийнятими згідно інженерно-геологічних досліджень, сильно відрізняється від реальних результатів, що, в свою чергу, суттєво впливає на перерозподіл зусиль у надземних конструкціях і приводить до збільшення витрат на будівництво.

МЕТА РОБОТИ

Дослідити процес ідентифікації параметрів ґрунту, використовуючи результати статичних випробувань паль. Виконати порівняння результатів напружено-деформованого стану (НДС) фундаментних конструкцій спільно з ґрунтовим масивом з характеристиками **до ідентифікації і після ідентифікації**.

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

В програмному комплексі «ЛІРА-Сапр» було створено об'ємний ґрунтовий масив за допомогою спеціальних нелінійних скінченних елементів №271. В центрі масиву стержневим елементом задано палю довжиною 30 м та з діаметром 820 мм. Загальний вигляд об'ємного ґрунтового масиву наведено на Рис. 1.

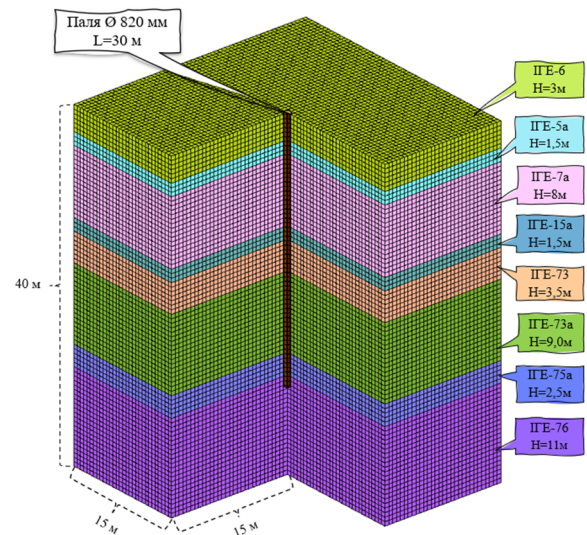


Рис.1. Загальний вигляд об'ємного ґрунтового масиву.

Fig.1. General view of the volumetric soil massif.

Ґрунтовий масив задано відповідно до інженерно-геологічного розрізу, який наведено на Рис. 4. Параметри ґрунтів задано згідно з таблицею 1 інженерно-геологічних досліджень. Навантаження прикладено кроковим методом, кількість кроків – 10, максимальне значення навантаження – 600 тс.

В результаті розрахунку було побудовано графік залежності осідання від навантаження. Після першого розрахунку помітно, що графік суттєво відрізняється від графіка згідно з статичними випробуваннями, тому необхідно виконувати ідентифікацію. Так як модуль пружності суттєво впливає на переміщення, в першу чергу було ідентифіковано саме цей параметр. Другий розрахунок було виконано аналогічно першому, тільки зі збільшеним модулем пружності, для всіх скінченних елементів ґрунтового масиву, у **2 рази**. Результат розрахунку показано на графіку залежності осідання від навантаження. Проаналізувавши цю криву, було прийнято рішення продовжити ідентифікацію, так як графік, порівняно з графіком за першим варіантом, більш схожий на графік за статичними випробуваннями, але він ще має суттєві відмінності. Далі було збільшено модуль пружності ґрунтового масиву в **3 рази** відносно початкових значень. Результати переміщень показано на Рис. 2.

Показано, що графік залежності осідання від навантаження для варіанту зі збільшеним модулем пружності в **3 рази**, є дуже близьким до графіка за статичними випробуваннями, проте, для отримання більш точних результатів, потрібно виконати наступний етап ідентифікації, зі збільшеним модулем пружності, відносно початкових значень в **4 рази**. Результати розрахунків показано на рис. 2 на графіку залежності осідання від навантаження. На даному графіку показано, що крива осідання зі збільшеним модулем пружності в **4 рази** є дуже схожою на криву згідно з статичними випробуваннями в межах лінійної частини.

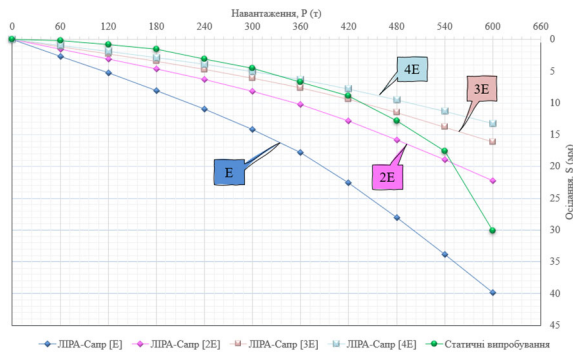


Рис.2. Графік залежності осідання від навантаження при різних значеннях модуля пружності об'ємного ґрунтового масиву.

Fig.2. The graph of the dependence of the settlement on the load at different values of the modulus of elasticity of the volumetric soil massif.

Наступним кроком в ідентифікації ґрунтових параметрів є ідентифікація кута внутрішнього тертя. Варто зазначити, що ідентифікація кута внутрішнього тертя виконується на вже ідентифікованому модулі пружності, тобто на збільшеному в **4 рази** відносно початкового значення. Перший етап ідентифікації зі стандартним значенням кута внутрішнього тертя. Наступний коефіцієнт, для ідентифікації кута внутрішнього тертя, становить **0,75**. Наступний розрахунок було виконано з коефіцієнтом **0,5** для кута внутрішнього тертя. Побудовано

графік залежності осідання від навантаження при різних значеннях кута внутрішнього тертя та зі збільшеним модулем пружності в **4 рази** відносно початкових даних та наведено на Рис. 3.

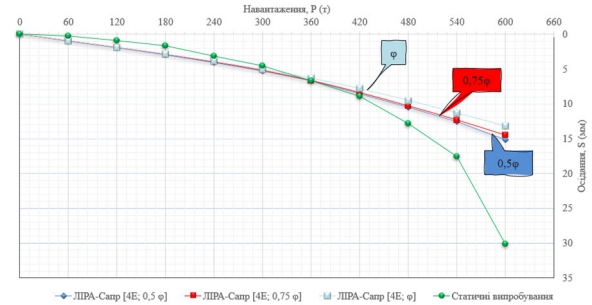


Рис.3. Графік залежності осідання від навантаження при різних значеннях кута внутрішнього тертя та зі збільшеним модулем пружності в 4 рази для об'ємного ґрунтового масиву.

Fig.3. The graph of the dependence of the settlement on the load at different values of the angle of internal friction and with an increased modulus of elasticity by 4 times for a volumetric soil massif.

Ідентифікацію питомого зчеплення немає необхідності виконувати, так як науковцями в [1] було доведено, що зміна цього параметру практично не впливає на результат розрахунку. Отже, в результаті ідентифікації ґрунтових параметрів, було прийнято для розрахунку системи «основа – фундамент – надземні конструкції» збільшити відносно початкових параметрів модуль пружності в **4 рази**, а кут внутрішнього тертя взяти з коефіцієнтом **0,5**. Відповідно до графіку, зображеного на Рис. 3, показано, що в межах навантаження 360-420 тс, осідання за результатами числового моделювання майже повністю відповідає осіданню за статичними випробуваннями. В попередньому розрахунку було визначено, що саме в такому діапазоні навантажень будуть працювати палі висотного будинку, який розглядається в даній роботі.

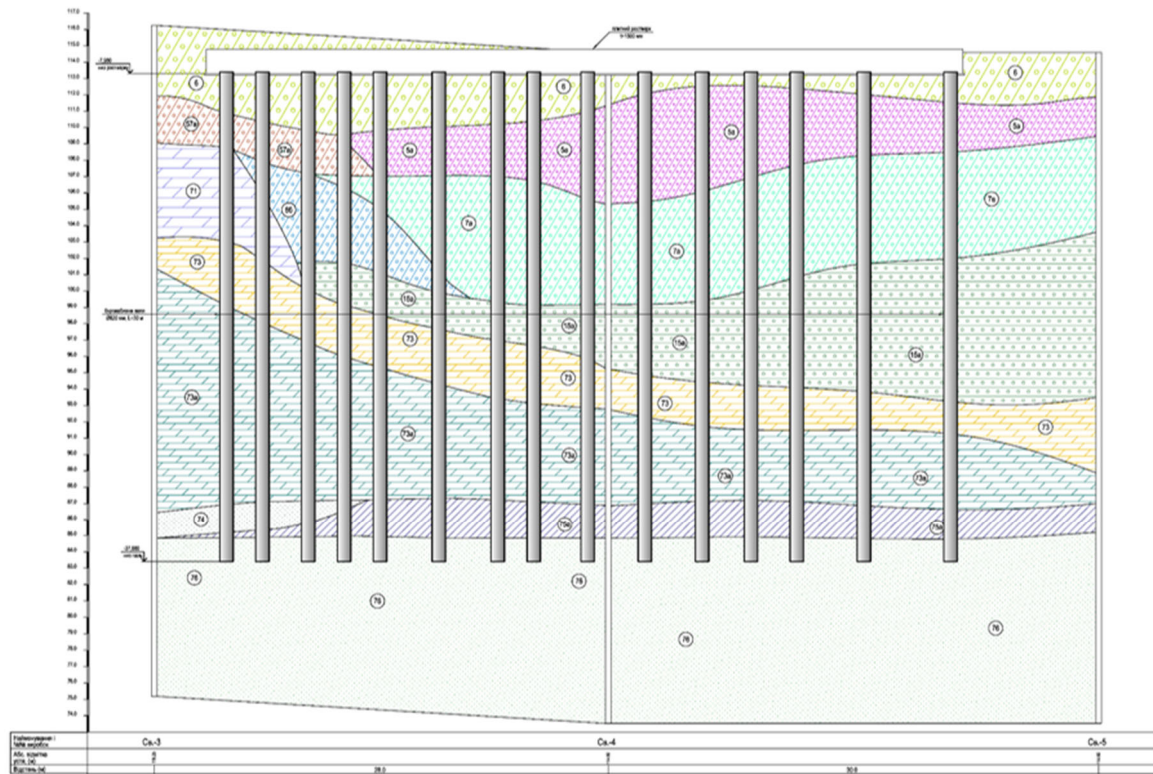


Рис.4. Інженерно-геологічний розріз майданчика будівництва та посадка фундаментів остаточного варіанту.

Fig.4. Engineering-geological section of the construction site and landing of the foundations of the final version.

Табл. 1. Показники фізико-механічних властивостей ґрунтів будівельного майданчика
Table 1. Indicators of physical and mechanical properties of the soils of the site

№ ПГЕ	Щільність ґрунту, г/см ³	Природна вологість, д.о.	Коефіцієнт пористості, д.о.	Кут внутрішнього тертя, градуси	Питоме зчеплення, кПа	Модуль деформації, МПа
	ρ	W	e	φ	c	E
6	1,58	0,140	0,880	17	31	20
5a	1,78	0,214	0,787	17	31	20
7a	1,90	0,210	0,669	14	13	14
8б	1,96	0,205	0,620	16	14	13
15a	1,91	0,286	0,796	14	18	17
57a	1,98	0,232	0,628	20	9	17
71	1,91	0,282	0,789	18	40	30
73	1,86	0,338	0,937	13	53	31
73a	1,92	0,304	0,833	12	40	20
74	1,93	0,140	0,532	31	3	32
75a	1,96	0,205	0,627	10	47	20
76	2,02	0,720	0,529	30	2	35

Наступний крок – це створення числової моделі системи «основа – фундамент – надземні конструкції» висотного будинку. Система створена в програмному комплексі «ЛІРА-Сапр». Загальний вигляд показано на Рис. 5. Основа задана як об’ємний ґрунтовий масив за допомогою нелінійних скінченних елементів та показана детально на Рис. 6.

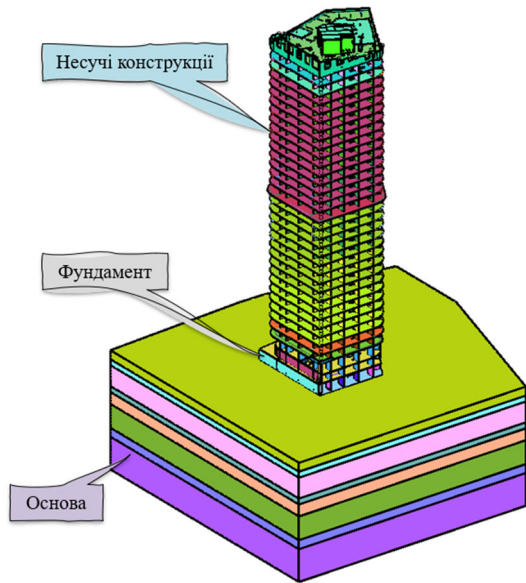


Рис.5. Загальний вигляд системи «основа – фундамент – надземні конструкції».
Fig.5. General view of the «base – foundation – above-ground structures».

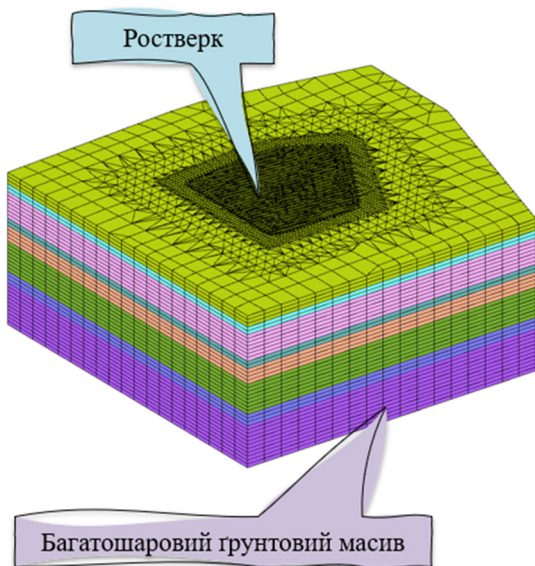


Рис.6. Об’ємний ґрунтовий масив.
Fig.6. volumetric soil massif.

На Рис. 7 показано фундаментні конструкції (ростверк, палі).

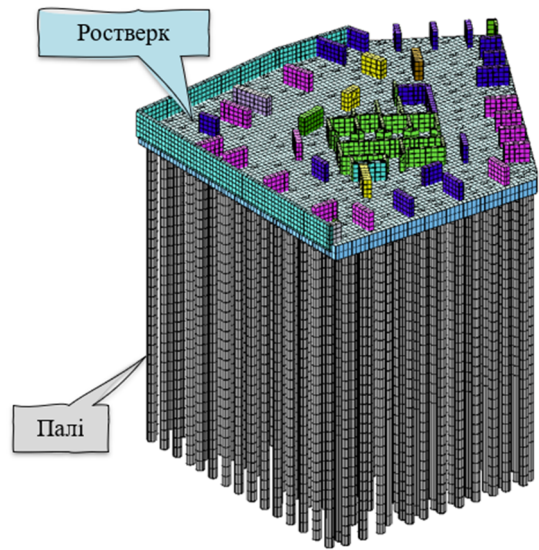


Рис.7. Загальний вигляд фундаментних конструкцій.
Fig.7. General view of the foundation structures.

Було виконано два порівняльних розрахунки загальної системи «основа – фундамент – надземні конструкції» та порівняно напружено деформований стан (НДС) фундаментних конструкцій для варіанту на об’ємному ґрунтовому масиві з параметрами до ідентифікації та після ідентифікації. Результати вертикальних переміщень ростверку показано на Рис. 8-10.

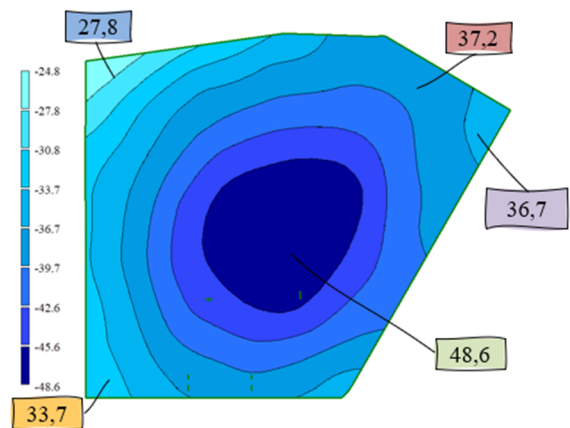


Рис.8. Вертикальні переміщення ростверку при параметрах ґрунту до ідентифікації.
Fig.8. Vertical movements of the grid at soil parameters before identification.

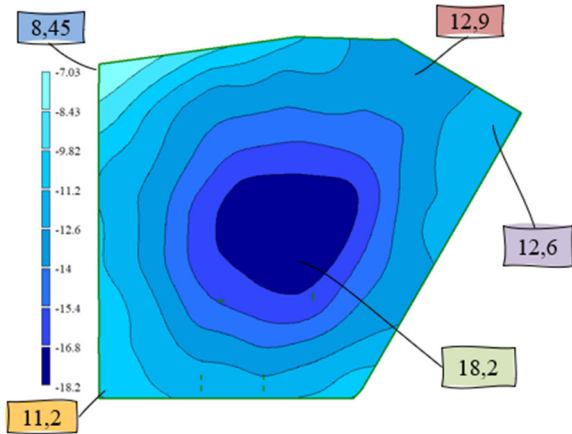


Рис.9. Вертикальні переміщення ростверку при параметрах ґрунту після ідентифікації.

Fig.9. Vertical movements of the grid at soil parameters after identification.

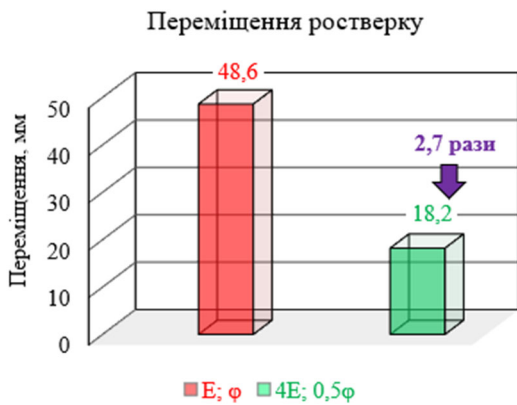


Рис.10. Діаграма вертикальних переміщень ростверку при різних параметрах об'ємного ґрунтового масиву.

Fig.10. The diagram of the vertical movements of the grid at different parameters of the volumetric soil massif.

В результаті розрахунків було виявлено, що перед проведенням числового моделювання системи «основа – фундамент – надземні конструкції» висотних будівель необхідно проводити ідентифікацію параметрів ґрунтового середовища для їх уточнення. Порівнявши значення переміщення ростверку, встановлено, що переміщення на моделі ґрунту з ідентифікованими параметрами майже в **3 рази** менші, ніж на моделі ґрунту з фізико-механічними характеристиками ґрунтів згідно інженерно-геологічних досліджень.

Наступним параметром для порівняння є

значення згинальних моментів (M_x), які виникають в ростверку на ґрунтовому масиві з різними параметрами. Результати показано на Рис. 11-13.

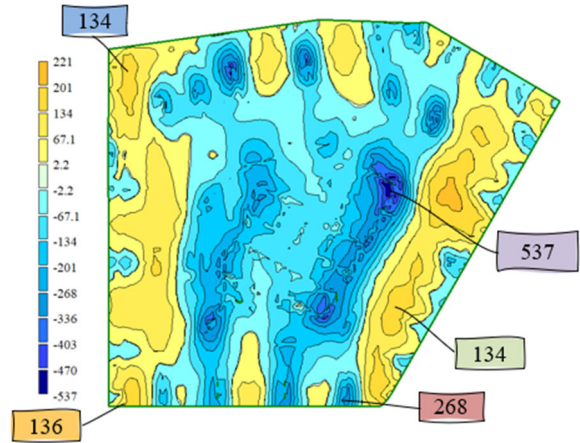


Рис.11. Значення згинальних моментів (M_x) ростверку при параметрах ґрунту до ідентифікації.

Fig.11. The value of the bending moments (M_x) of the grid at soil parameters before identification.

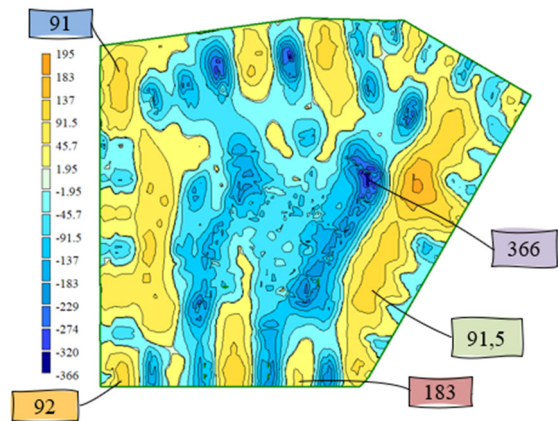


Рис.12. Значення згинальних моментів (M_x) ростверку при параметрах ґрунту після ідентифікації.

Fig.12. The value of the bending moments (M_x) of the grid at soil parameters after identification.

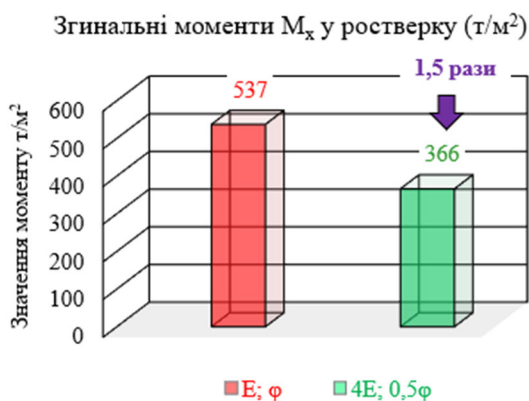


Рис.13. Діаграма значень згинальних моментів (M_x) ростверку при різних параметрах об'ємного ґрунтового масиву.

Fig.13. The diagram of the of the values of the bending moments (M_x) of the grid at different parameters of the volumetric soil massif.

Порівнявши значення згинальних моментів (M_x), які виникають у ростверку, встановлено, що значення моментів на моделі ґрунту з ідентифікованими параметрами в **1,5 рази** менші, ніж на моделі ґрунту з фізико-механічними характеристиками ґрунтів згідно інженерно-геологічних досліджень.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Встановлено, що для отримання коректних результатів переміщення фундаментних конструкцій, необхідно виконувати ідентифікацію ґрунтових параметрів на основі натурних випробувань паль. З'ясовано, що при числовому моделюванні роботи палі з ґрунтовым масивом, на значення переміщення найбільше впливає модуль деформації ґрунту. Показано, що зміна кута внутрішнього тертя практично не впливає на характер осідання палі, але тільки в межах лінійної частини графіку, а при нелінійній поведінці – кращі результати дає зменшене значення кута внутрішнього тертя у **2 рази**. Доведено, що після ідентифікації параметрів ґрунтів, **переміщення та згинальні моменти**, які виникають в ростверку, порівняно з моделлю ґрунту, в якій параметри ґрунту прийняті відповідно до даних з інженерно-геологічних досліджень, зменшуються до

3 та 1,5 разів відповідно, що, в свою чергу, суттєво впливає на перерозподіл зусиль у цілому каркасі будівлі. Тому, для надійного та економічного проектування пальових фундаментів необхідно проводити ідентифікацію ґрунтових параметрів на основі натурних випробувань паль та моделювати систему «основа – фундамент – надземні конструкції» спільно з об'ємним ґрунтовым масивом.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бойко І. Числове моделювання взаємодії бурин'екційної палі з ґрунтовым масивом при дії статичного вертикального навантаження. / І. Бойко, О. Кривенко // *Основи та фундаменти: Науково-технічний збірник*. – К.: КНУБА. – 2021. – Вип. 43. – С. 9-16.
2. Бойко І. Ідентифікація параметрів ґрунту на основі натурних випробувань паль. / І. Бойко, Л. Скочко, М. Хоронжевський // *Основи та фундаменти: Науково-технічний збірник*. – К.: КНУБА. – 2021. – Вип. 42. – С. 9-18.
3. Носенко В. Визначення напружено-деформованого стану групи паль шляхом числового моделювання їх взаємодії з основою за даними польових досліджень. / В. Носенко, О. Кашоїда // *Основи та фундаменти: Науково-технічний збірник*. – К.: КНУБА. – 2021. – Вип. 43. – С. 87-100.
4. Носенко В.С. Напружено-деформований стан пальово-плитних фундаментів секційних висотних будинків: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / Носенко Віктор Сергійович. – К.: КНУБА, 2012. – 175с.
5. Основи та фундаменти споруд. Зміна № 1: ДБН В.2.1-10-2009. – [Чинний від 2011-07-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 55с.
6. Бойко І.П. Особливості взаємодії пальових фундаментів під висотними будинками з їх основою. / І.П.Бойко // *Основи і фундаменти: Міжвідомчий науково-технічний збірник*. – К.: КНУБА. – 2006. – Вип. 30. – С. 3-8.

REFERENCES

1. Boyko I., Krivenko O. (2021). Chuslove modelivannia vzaiemodii byroinektiinoi pali z gryntovum masivom pru dii statuchnogo vertikalnogo navantajennia [Numerical simulation of interaction continuous flight auger pile with a soil mass under static vertical load]. *Osnovu ta*

- fundamenty: Naukovo-tekhnichnyj zbirnyk.* Kyiv: KNUBA, 43, 9-16 (in Ukrainian).
2. Boyko I., Skochko L., Khoronzhevskiy M. (2021). Identifikatsia parametriv gryntiv na osnovi rezyltativ natyrmih vuprobyvan pal [Identification of soil parameters based on the results of field tests of piles]. *Osnovu ta fundamenty: Naukovo-tekhnichnyj zbirnyk.* Kyiv: KNUBA, 42, 9-18 (in Ukrainian).
 3. Nosenko V. Kashoida. O. (2021). Vyznachennia napryjeno-deformovanogo stany grypi pal shliahom chislovogo modeliyvannia ih vzaiemodii z osnovoioy za dannimi poliovih doslidjen [Determination of the stress-strain state of group of piles by numerical simulation of their interaction with the base according to field research data]. *Osnovu ta fundamenty: Naukovo-tekhnichnyj zbirnyk.* Kyiv: KNUBA, 43, 87-100 (in Ukrainian).
 4. Nosenko V.S. (2012). Napruzhenodeformovanyj stan paljovo-plytynk fundamentiv sekcijnykh vysotnykh budynkiv [Stress-strain state of plate-pile foundations of sectional high-rise buildings]. Dys. kand. tekhn. nauk: 05.23.02. Kyiv: KNUBA, 175 (in Ukrainian).
 5. *Osnovy ta fundamenty sporud. Zmina 1: DBN V.2.1-10-2009.* (2011). Kyiv: Minregionbud Ukrayiny, 55 (in Ukrainian).
 6. Boyko I.P. (2006). Osoblyvosti vzaiemodii palovykh fundamentiv pid vysotnymy budynkamy z yikh osnovoioy [Features of the interaction of pile foundations under high-rise buildings with their foundation]. *Osnovu i fundamenty: Mizhvidomchyj naukovo-tekhnichnyj zbirnyk.* Kyiv: KNUBA, 30, 3-8 (in Ukrainian).

Identification of soil parameters in the calculation of high-rise buildings on pile foundation

Vasyl Pidlutskyi,
Vasyl Behan

Summary. The results of numerical modeling of the interaction of bored piles with the soil environment are presented. The process of identifying soil parameters according to static tests of piles was studied. The parameters of the soil, which have the greatest influence on the change in the graph of the dependence of the pile settlement on the load, are singled out.

The research process can be divided into the

following stages: creation of a numerical model of the interaction of the pile with the volumetric soil array in the PC «LIRA-Sapr». The size of the array is 30x30x40 m, based on the research of scientists [1]. The pile is defined by a rod finite element (pile length 30 m, diameter 0.82 m). The array is defined by non linear finite elements with characteristics according to data from engineering and geological studies. The load is applied step by step (10 steps) with a maximum value of 600 ton-forces. 4 variants of the volumetric soil massif with different values of the modulus of elasticity were considered. In the first variant, the modulus of elasticity is unchanged, in the second it is increased by 2 times, in the third by 3 times and in the fourth variant by 4 times. The modulus of elasticity increased simultaneously in all elements of the soil massif. According to the calculation, it was established that when the elasticity modulus is increased by 4 times, the graph of the dependence of the settlement on the load is close to the graph of field tests. Further, the identification of the angle of internal friction was carried out, with an increased modulus of elasticity by 4 times. It was established that in the soil model with the angle of internal friction taken with a factor of 0.5, the settlement graph of the test pile is very close to the test graph. Therefore, for the calculation of the «base – foundation – above-ground structures» system, it is customary to increase the elasticity modulus by 4 times and take the angle of internal friction with a factor 0.5.

The calculation of the «base – foundation – above-ground structures» system for a high-rise building with identified soil parameters and with parameters that were before identification was performed. The stress-strain state of foundation structures for two variants of soil conditions was investigated. Redistribution of forces in foundation structures with both variants of soil parameters is given

Key words. Identification of soil parameters, pile foundation, numerical modeling, high-rise building.