

Взаємодія ґрунтової основи та групи паль, об'єднаних ростверком

Віталій Ручківський¹

Київський національний університет будівництва і архітектури
31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037,
¹ruchkivsky8@ukr.net, orcid.org/ 0000-0001-8982-2884

DOI: 10.32347/0475-1132.43.2021.79-86

Анотація. Більшість пально-плитних фундаментів проектуються без врахування вкладу ростверку. Хоча добре відомо, що ростверк грає важливу роль в загальній несучій здатності. В таких конструкціях, зазвичай, загальне осідання фундаменту, ймовірно, буде невеликим через встановлення великої кількості паль, більше ніж необхідно. Однак з економічної точки зору бажано, щоб фундамент було запроєктовано таким чином, щоб осідання були обмежені до прийняттого рівня, але із врахуванням несучої здатності ростверку.

Розглядається задача роботи групи паль із врахуванням взаємодії між палями через ґрунтову основу. При взаємодії виникають додаткові напруження в міжпальовому просторі, тобто виникає ефект «обтискання» паль ґрунтом від навантажень, що передаються на сусідні палі.

Приведено результати дослідження сумісної роботи паль та ростверку під дією статичного навантаження за допомогою числового моделювання. В дослідженні використовувались група паль (5шт.) діаметром 420мм, довжиною 10м, об'єднаних ростверком. В якості основи пального фундаменту використовувався пісок дрібний середньої щільності.

Числове моделювання проводилось з використанням ідеальної пружно-пластичної моделі із критерієм міцності Кулона-Мора.

Виконувалось порівняння роботи паль при різних відстанях між палями (1.5-2.5м) та товщині ростверку 300; 500мм.

Проаналізовано взаємодію паль та ростверку з навколишнім ґрунтовим масивом. Під нижнім кінцем палі, в зоні контакту палі з ґрунтом виникає складний напружено-деформований стан. Значний вплив на цей напружено-



Віталій Ручківський
асистент кафедри
геотехніки

деформований стан має крок, діаметр, довжина паль, а також жорсткість ростверку. Врахування впливу цих факторів необхідно для визначення закономірностей розподілу зовнішнього навантаження між палями і ростверком.

Виявлена нерівномірність осідання групи паль, об'єднаних ростверком. По-різному включаються в роботу центральна та крайні палі.

Встановлено, що включення пального ростверку в роботу залежить від його жорсткості, а також осьової відстані між палями.

Досліджено, що при зміні відстані між палями змінюється перерозподіл зусиль в ростверку та палях.

Ключові слова. Напружено-деформований стан, паля, ростверк, вертикальні деформації.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

При взаємодії паль, об'єднаних ростверком, з навколишнім ґрунтом виникає складний напружено-деформований стан, як під нижнім кінцем палі, так і в зоні контакту палі з ґрунтом. Значний вплив на цей напружено-деформований стан має крок, діаметр, довжина палі, а також жорсткість ростверку. Врахування цих факторів необхідно для визначення закономірностей розподілу зовнішнього навантаження між палями і ростверком.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

У роботах багатьох науковців висвітлено проблему необхідності розрахунку перерозподілу навантаження між палями та ростверком. Результати експериментальних і теоретичних досліджень показують суттєві відмінності в поведінці групи паль на відміну від роботи одиночної палі. Основний фактор, що впливає на поведінку паль в куці є взаємодія паль через ґрунтову основу. Актуальність цього питання полягає у відсутності чітких методів визначення несучої здатності паль в складі пального поля. Врахування роботи ростверку в залежності від його жорсткості та включення паль дає змогу оптимізувати пальнове поле, що впливає на матеріалоемність та, як наслідок, на кінцеву вартість фундаментних конструкцій. Вирішення проблеми перерозподілу напружень в пально-плитних фундаментах звернено увагу в працях І.П. Бойка [2], М.Ф. Randolph [3], Kull T., Mets M., Leppik V. [4].

МЕТА РОБОТИ

Основною метою даної роботи є дослідити процес взаємодії групи паль, об'єднаних ростверком, з ґрунтовою основою:

- дослідити роботу паль з ростверком і ґрунтовою основою залежно від відстані між палями;
- виявити вплив зміни жорсткості плити на перерозподіл зусиль у групі паль.

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

В сучасних умовах при будівництві будівель і споруд спостерігається тенденція до збільшення навантажень на ґрунтову основу. Багато будинків споруджуються в щільній забудові та при наявності слабких ґрунтів в основі. Ці умови в свою чергу вимагають від фундаментних конструкцій збільшення несучої здатності та відповідно зменшення осідання. В даному випадку найбільш придатним типом фундаменту є плитно-пальовий фундамент.

При взаємодії групи паль, об'єднаних ростверком, виникають додаткові радіальні (нормальні) напруження, виникає ефект «обтискання» паль від навантажень, що передаються на сусідні палі. Суть роботи паль у групі полягає в тому, що при навантаженні пального поля, яке прикладається до верху плит об'єднуючого ростверку, на кожну палю передаються вертикальна та горизонтальна складові навантаження від ґрунту, що оточує палю,

В рамках дослідження було проведено моделювання трьох варіантів розташування паль в ростверку, при змінній його товщині. Відповідно розглядалась відстані між палями 1.5м, 2.0м та 2.5м. Товщини ростверку 300 та 500мм. При цьому до центру ростверку було прикладено навантаження, що складає 4000кН (Рис.1-3).

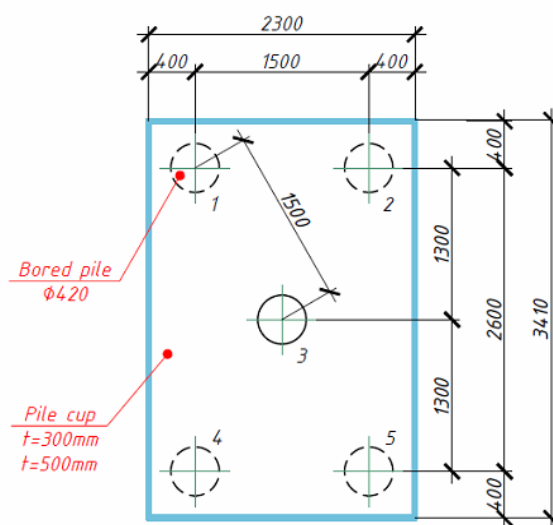


Рис.1. Варіант 1 групи паль (1.5м між палями).
Fig.1. Variant 1 of pile group (1.5m between piles).

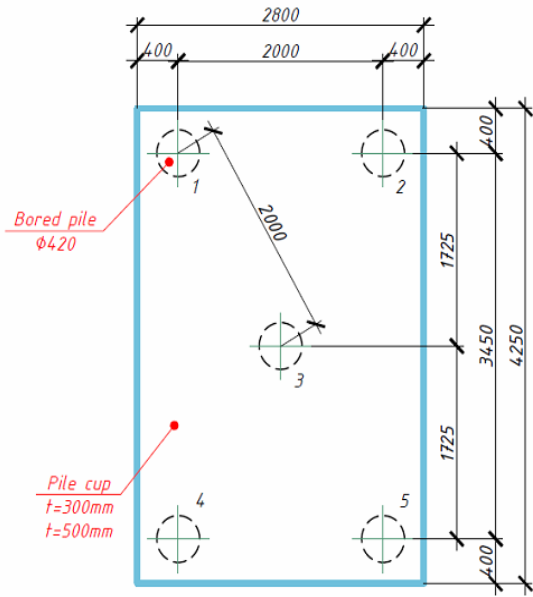


Рис.2. Варіант 2 групи палей (2.0м між палями).
Fig.2. Variant 2 of pile group (2.0m between piles).

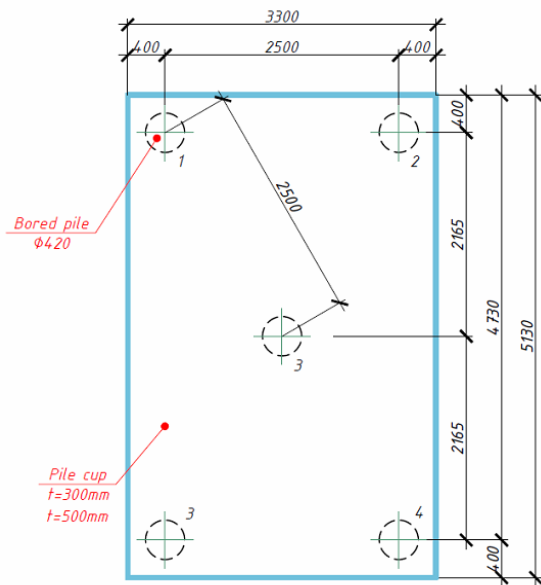


Рис.3. Варіант 3 групи палей (2.5м між палями).
Fig.3. Variant 3 of pile group (2.5m between piles).

Числове моделювання напружено-деформованого стану системи «грунтовий масив-фундаментні конструкції» проводилось за допомогою методу скінченних елементів, що дало змогу врахувати по-етапне влаштування пально-плитного фундаменту, визначити напруження і переміщення в усіх елементах системи. Для моделювання ґрунтового масиву використовувалась ідеа-

льно пружно-пластична модель ґрунту з граничною поверхню, яка описується критерієм Мора-Кулона (модель Мора-Кулона). Ця модель є найпростішою нелінійною моделлю ґрунту. Її перевагою є простота налаштування параметрів. При розрахунку деформацій зсуву ця модель повністю ігнорує нелінійність з об'ємним стисненням, що є її основним недоліком. Усі деформації в межах граничної поверхні є пружними (зворотними). Загалом, модель лише трохи доповнює лінійну модель, обмежуючи рівень напружень зсуву (Рис.4,5). Для моделі використовувались параметри, що відображені в табл. 1.

Табл.1. Фізико-механічні характеристики ґрунту.

Table 1. Physical and mechanical characteristics of soil

№ ПЕ	Назва ґрунту	Щільність, g/cm ³	Модуль деформації, Мра	Кут внутрішнього тертя, град	Штгоме зчеплення, кРа
1	Пісок дрібний, середньої щільності	1.85	35	32	1

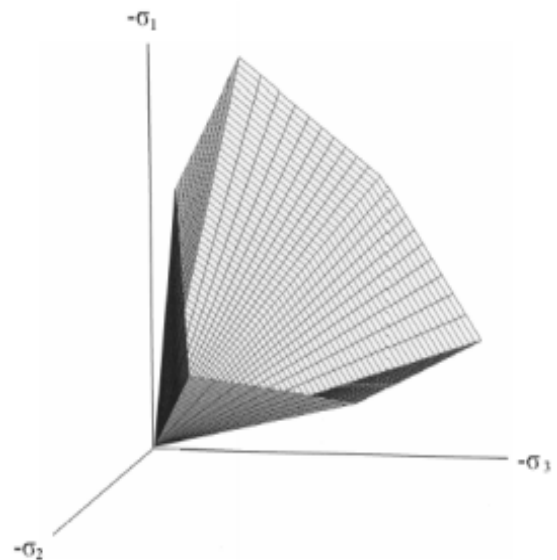


Рис.4. Гранична поверхня визначена критерієм міцності Кулона-Мора

Fig.4. Yield surface defined Coulomb-Mohr criterion

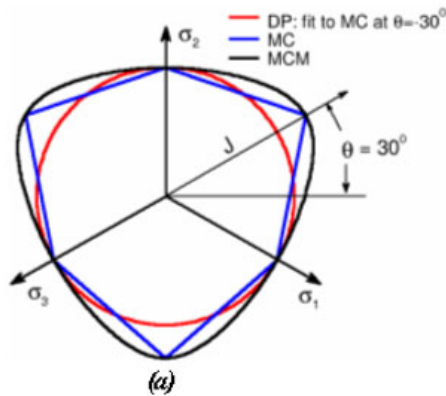


Рис.5. Проекція поверхонь текучості на девіаторну площину
 Fig.5. Projection of yield surfaces into deviatoric

Для розрахунку задачі було розроблено скінченно-елементну модель ґрунтового масиву та пальово-плитного фундаменту (Рис. 6,7) з врахуванням геометричної конфігурації та фізико-механічних характеристик. Ґрунтову основу було задано як об'ємний масив з фізико-механічними характеристиками, отриманими за результатами інженерно-геологічних досліджень. Розміри ґрунтового масиву 30x30x25м.

Нижня частина розрахункової схеми, на відстані 15м від підшви палі обмежена площиною, яка закріплена від вертикальних переміщень. По бічних площинах на основу накладені в'язі, що перешкоджають нормальним до площин переміщенням.

Розрахунок проводився в 6 етапів. Статичне навантаження було прикладено в чотири етапи, кожна 1000 кН.

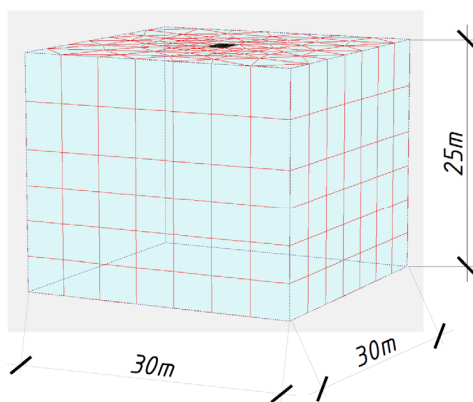


Рис.6.Ґрунтовий масив методу скінченних елементів
 Fig.6. Meshed soil massif

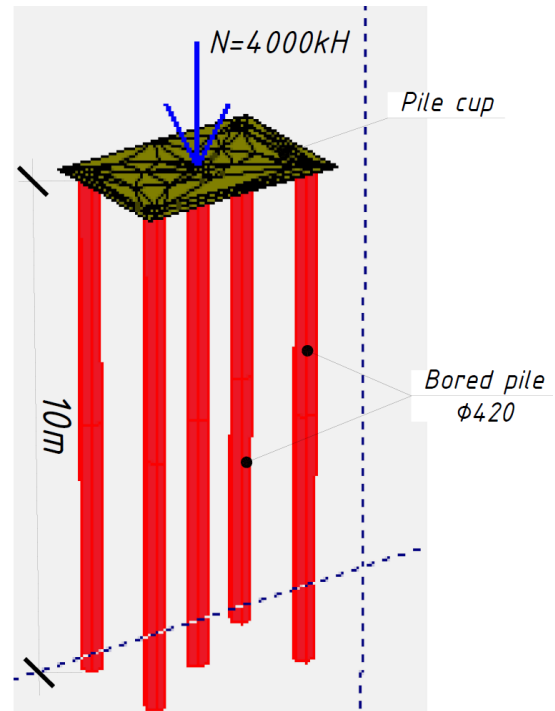


Рис.7. Розрахункова модель
 Fig.7. Design model

У першому дослідженні виконувалось порівняння вертикальних деформацій палей під навантаженням у залежності від осової відстані між палями (Рис.8). Зі збільшенням відстані між палями спостерігається зменшення осідання палей. При чому зміни цих значень відрізняються в центральній та крайніх палях. Так при збільшенні відстані до 2.0м відбулося зменшення осідання в центральній палі на 18%, в крайніх від 26 до 29% (Рис.9)

У випадку з подальшим збільшенням відстані між палями зберігається тенденція по зменшенню вертикальних деформацій палей. У центральній палі осідання зменшились на 25% та на 40-46% - у крайніх (Рис.10).

Зменшення осідання при збільшенні відстані між палями свідчить про те, що зменшується взаємодія палей через ґрунтове середовище, що в свою чергу веде до збільшення несучої здатності палей та включення ростверку в роботу. Звідси можна зробити висновок, що чим менший крок палей, тим більша сила обтискання палей ґрунтом. При збільшенні кроку палей, навпаки, сила обтиснення зменшується.

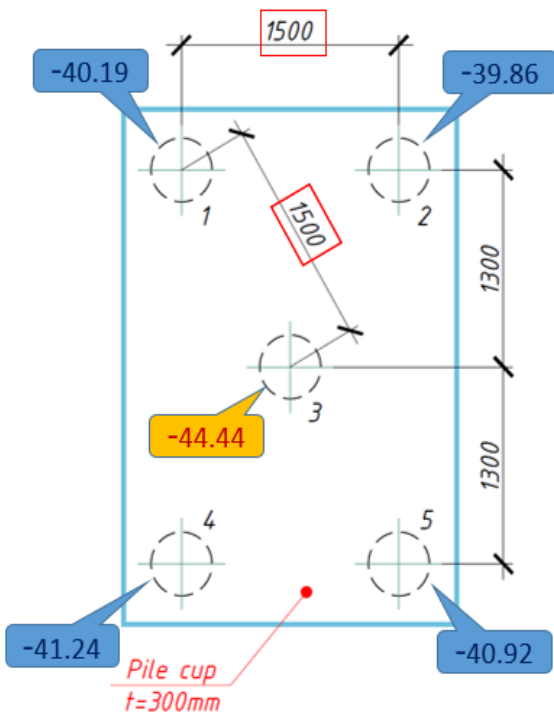


Рис.8. Вертикальні деформації при відстані між палями 1.5м.
Fig.8. Vertical displacements at a distance between piles of 1.5m

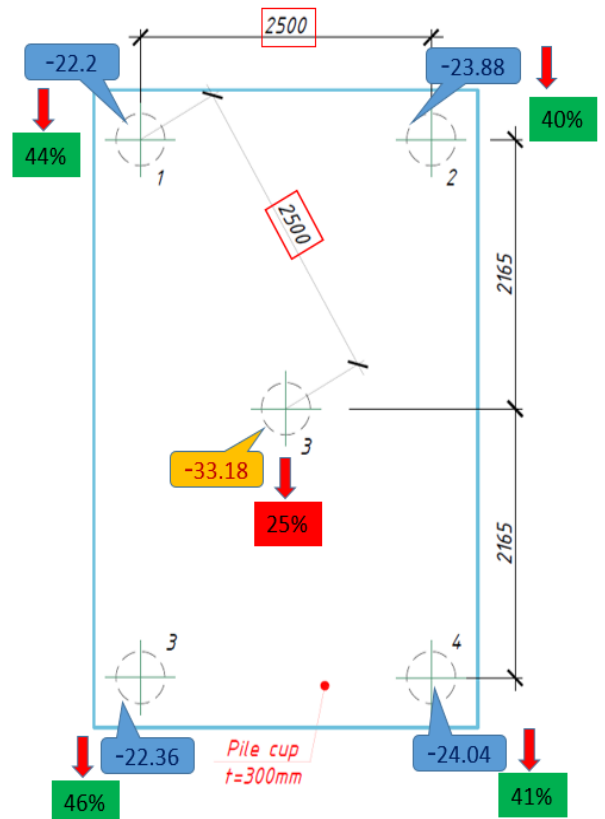


Рис.10. Вертикальні деформації при відстані між палями 2.5м.
Fig.10. Vertical displacements at a distance between piles of 2.5m

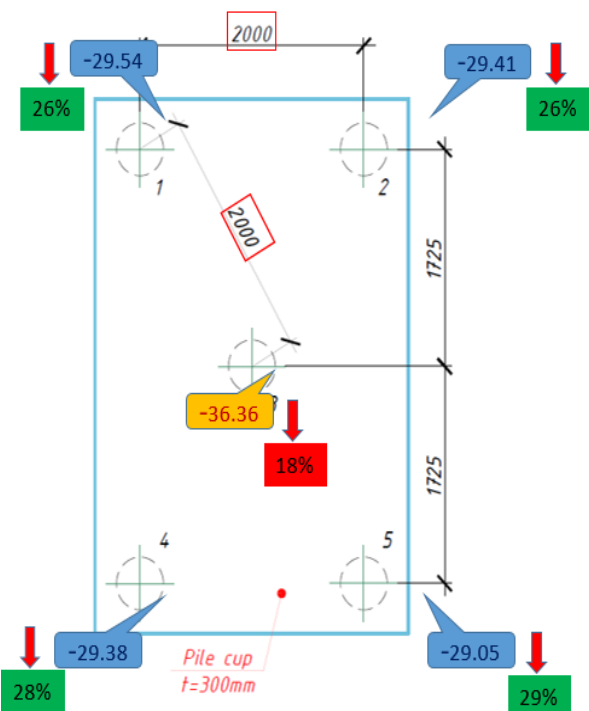


Рис.9. Вертикальні деформації при відстані між палями 2.0м.
Fig.9. Vertical displacements at a distance between piles of 2.0m

На наступних графіках (Рис.11, 12, 13) вказано залежність між навантаженням та відстанню між палями для центральної та периферійних палей. З кожною стадією довантаження від 1000 до 4000кН змінюється перерозподіл напружень між центральною (до якої прикладене навантаження) та кутowymi палями. Найменша розбіжність у значеннях осідань спостерігається при кроку палей 1.5м, що складає 10%.

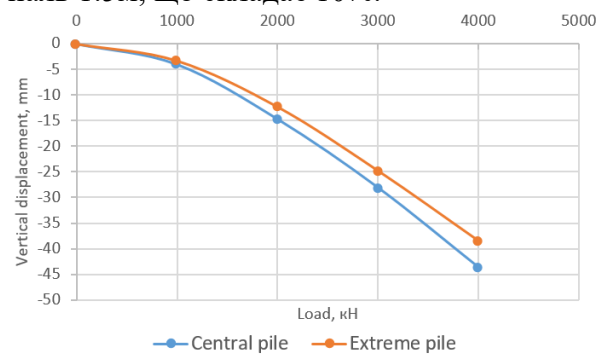


Рис.11. Залежність між навантаженням та деформаціями при відстані між палями 1.5м
Fig.11. Dependence between load and deformations at a distance between piles of 1.5m

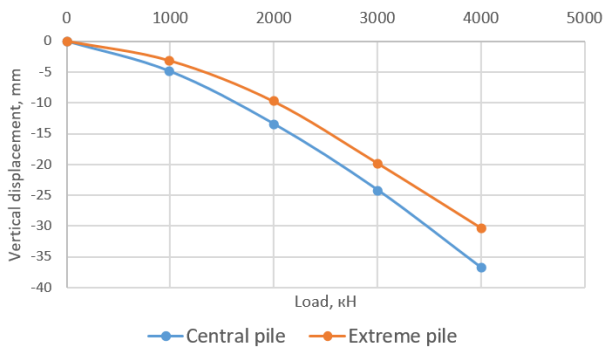


Рис.12.Залежність між навантаженням та деформаціями при відстані між палями 2.0м
 Fig.12.Dependence between load and deformations at a distance between piles of 2.0m

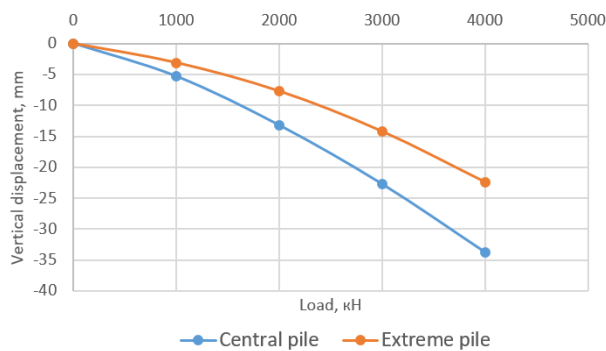


Рис.13.Залежність між навантаженням та деформаціями при відстані між палями 2.5м
 Fig.13.Dependence between load and deformations at a distance between piles of 2.5m

Збільшення відстані між палями призводить до зростання відповідно і різниці осідань між крайніми та центральною палями. У випадку відстані між палями 2.0м розбіжність осідання крайніх палей менше на 20%, ніж значення вертикальної деформації центральної палі. При 2.5м між палями різниця збільшилась до 33%.

Суттєвий внесок у загальну несучу здатність фундаментних конструкцій дає жорсткість об'єднуючого ростверку. Для висвітлення цього впливу порівнювались вертикальні деформації палей при ростверках товщиною 300 та 500мм при кроках палей 1.5, 2.0, 2.5м (Рис. 14, 15, 16).

Відповідно до результатів розрахунку, збільшення товщини ростверку призводить до зменшення осідання, внаслідок зростання жорсткості ростверку. Так, при товщині 500мм осідання в центральній палі зменшились на 10% при кроці 1.5м, на 21% при 2.0м та 28% при 2.5м між палями.

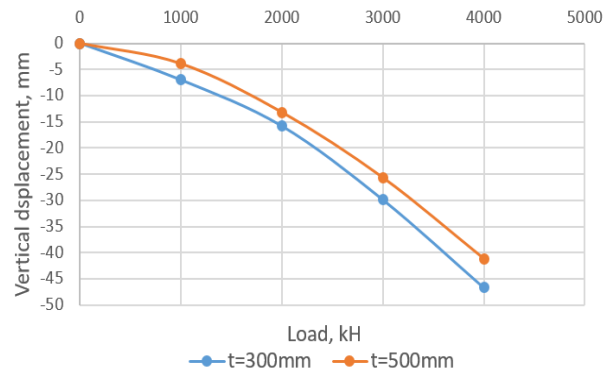


Рис.14. Вертикальні деформації в центральній палі в залежності від товщини ростверку при відстані між палями 1.5м
 Fig.14. Vertical deformations in the central pile depending on the thickness of pile cup at the distance between piles 1.5m

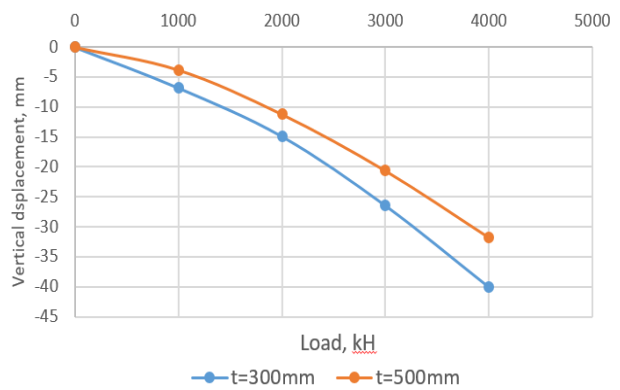


Рис.15. Вертикальні деформації в центральній палі в залежності від товщини ростверку при відстані між палями 2.0м
 Fig.15. Vertical deformations in the central pile depending on the thickness of pile cup at the distance between piles 2.0m

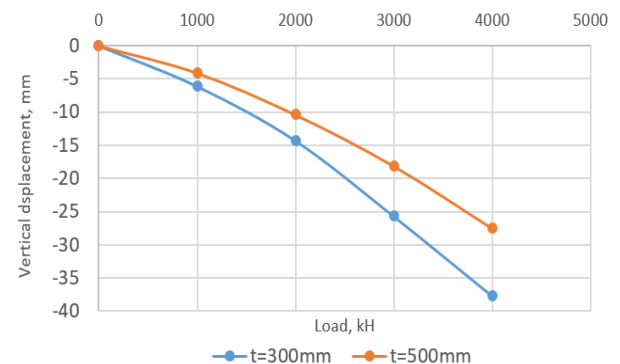


Рис.16. Вертикальні деформації в центральній палі в залежності від товщини ростверку при відстані між палями 2.5м
 Fig.16. Vertical deformations in the central pile depending on the thickness of pile cup at the distance between piles 2.5m

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Встановлено, що осідання групи паль, об'єднаних ростверком, відбувається нерівномірно. Таким чином, різниця між вертикальними деформаціями крайньої та центральної палі становить від 11 до 33%.

2. Встановлено, що включення пальнового ростверку в роботу залежить від його жорсткості та осьової відстані між палями.

3. Показано, що при зміні відстані між палями змінюється перерозподіл зусиль у ростверку та палі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Основи і фундаменти будівель та споруд. ДБН В.2.1-10-2009 [Чинні від 2009-07-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 84 с. – (Державні будівельні норми).
2. Бойко І.П. Особливості взаємодії палових фундаментів під висотними будівлями з їх основою // Основи і фундаменти: міжвідомчий науково-технічний збірник. – К: КНУБА, 2006 – Вип. 30 – С. 3-8.
3. Цимбал С.Й. Експериментальне дослідження напруженого стану в основі моделі височої палі // *Республ. міжвідомчий науч.-техн. зб. Основи і фундаменти* – Київ: Будівельник, 1973.- Вип.6. – С.134-141.
4. Randolph M.F. Design method for pile groups and piled rafts // 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 5-10 January 1994, New Delhi, India, Vol. 5, pp. 61-82.
5. Kull T., Mets M., Leppik V. Interaction of piles and raft // Proceedings of 13th Baltic Sea Geotechnical Conference. «Historical Experience and Challenges of Geotechnical Problems in Baltic Sea Region, 22-24 September. – Lithuania, 2016.
6. Poulos H.G. Analysis of the settlement of pile groups // *Geotechnique*. 1968. Vol.18 Issue 4. Pp.449-469.
7. Russo G., Viggiani C. Factors controlling soil-structure interactions for piled rafts // *Darmstadt Geotechnics (Darmstadt University of Technology)*. – 1998. – No.4. – P.297-322.
8. K. Horikoshi, M.F. Randolph, A contribution to optimal design of piled rafts (1998) *Géotechnique*, 48, pp. 301-317.

REFERENCES

1. *Osnovy` i fundamenti` budivel` ta sporud. DBN V.2.1-10-2009 (2009) [Bases and foundations of buildings] Chy`nni vid 2009-07-01 – K.: Minregionbud Ukrayiny`, 2009. – 84 s. – (Derzhavni budivel`ni normy`).*
2. Bojko I.P. (2006) *Osobly`vosti vzayemodiyi pal`ovy`x fundamentiv pid vy`sotny`my` budivlyamy` z yix osnovoyu [Features of interaction of pile foundations under high-rise buildings with their bases]. Osnovy` i fundamenti`: mizhvidom-chy`j naukovo-texnichny`j zbirny`k.* – K: KNUBA, – Vy`p. 30 –S. 3-8. (in Ukrainian).
3. Tsymbal S.Y. *Eksperymentalne doslidzhennia napruzhеноho stanu v osnovi modeli vysyachoi pali [Experimental study of the stress state at the heart of the hanging pile model]. Respubl. mizhvidomchyi nauch.-tekhn. zb. Osnovy i fundamenti – Kyiv: Budivelnyk, 1973.- Vyp.6. – S.134-141. (in Ukrainian).*
4. Randolph M.F. (1994). Design method for pile groups and piled rafts. 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 5-10 January, New Delhi, India, Vol. 5, pp. 61-82.
5. Kull T., Mets M., Leppik V. (2016) Interaction of piles and raft. Proceedings of 13th Baltic Sea Geotechnical Conference. «Historical Experience and Challenges of Geotechnical Problems in Baltic Sea Region, 22-24 September. Lithuania.
6. Poulos H.G. (1968). Analysis of the settlement of pile groups. *Geotechnique*. Vol.18 Issue 4. Pp.449-469.
7. Russo G., Viggiani C. (1998). Factors controlling soil-structure interactions for piled rafts. *Darmstadt Geotechnics (Darmstadt University of Technology)*. No.4. – P.297-322.
8. K. Horikoshi M.F., Randolph A. (1998). contribution to optimal design of piled rafts. *Géotechnique*, 48, pp. 301-317.

Interaction between a subsoil and group of piles joined with a raft

Vitalii Ruchkivskyi

Summary. Most pile-slab foundations are designed without taking into account the contribution of growth. Although it is well known that the grille plays an important role in overall load-bearing capacity. In such structures, the overall subsidence of the foundation is likely to be

small due to the installation of more piles than necessary. However, from an economic point of view, it is desirable that the foundation be designed in such a way that the subsidence is limited to an acceptable level, but taking into account the bearing capacity of growth.

The main problem is a work of pile's group taking into account interaction between piles through a soil base is considered. During the interaction there are additional stresses in the inter-pile space, there is an effect of "compression" of the piles by the soil from the loads transmitted to neighboring piles.

This paper presents the results of a study of the joint work of piles and grilles under the action of static load using numerical simulations. The study used a group of piles (5 pcs.) With a diameter of 420 mm and a length of 10 m, combined with a grid. Fine sand of medium density was used as the basis of the pile foundation.

Numerical modeling was performed using an ideal elastic-plastic model with the Coulomb-Mohr strength criterion.

The work of piles at different distances between piles (1.5-2.5 m) and grating thickness 300 was compared; 500mm.

The interaction of piles and growth-verification with the surrounding soil mass is analyzed. At the lower end of the pile, in the area of contact of the pile with the ground there is a complex stress-strain state. The pitch, diameter, length of the piles, as well as the rigidity of the grille have a significant effect on this stress-strain state. Taking into account the influence of these factors is necessary to determine the patterns of distribution of external loads between the piles and the grille.

Irregular settling of the group was revealed piles joined by a grid. The central and extreme piles are included in the work in different ways.

It is established that the inclusion of the pile grid in the work depends on its stiffness, as well as the axial distance between the piles.

It is investigated that when the distance between the piles changes, the redistribution of forces in the growth piles and piles changes.

Key words. Stress-strain state, pile, pile cup, vertical displacements.