

Зміна перерозподілу зусиль між елементами пальового фундаменту по мірі зростання навантаження

Ірина Маєвська¹, Наталя Блащук²

Вінницький національний технічний університет
95, Хмельницьке шосе, Вінниця, Україна, 21000,

¹ irina.mayevskaja@gmail.com, orcid.org/ 0000-0001-5999-6824

² blaschuk@vntu.edu.ua, orcid.org/0000-0001-9764-0271

DOI: 10.32347/0475-1132.44.2022.55-66

Анотація. Маючи при проєктуванні пальового фундаменту несучу здатність паль, визначену тим чи іншим шляхом, а також розрахунковий опір під подошвою ростверку як фундаменту мілкового закладання, можна за допомогою даних про ступінь реалізації несучої здатності кожного з елементів пальового фундаменту вийти на його сумарну несучу здатність. Але відомо, що на різних етапах навантаження ступінь реалізації несучої здатності елементів пальового фундаменту може змінюватись.

Метою даної роботи є аналіз зміни перерозподілу зусиль між елементами пальового фундаменту при поступовому зростанні навантажень на нього. Це дозволить обґрунтувати вибір критичного значення осідання, для якого доцільно визначати ступені реалізації несучої здатності елементів пальового фундаменту, що можуть пропонуватись для використання при проєктуванні.

Аналіз зміни перерозподілу зусиль між елементами пальового фундаменту при поступовому зростанні навантажень на нього був виконаний для кущового пальового фундаменту на основі фізичного моделювання на маломасштабних моделях, а також математичного моделювання за допомогою програмного комплексу Plaxis.

Встановлено, що паля у складі куща, як за результатами фізичного моделювання, так і за результатами математичного моделювання, поступово реалізує свою несучу здатність по мірі зростання навантаження і при значних значеннях осідання сприймає навантаження, більше за граничне навантаження одиночної палі.

Отже, на певному етапі навантаження ступінь реалізації несучої здатності палі починає



Ірина Масвська

доцент кафедри
будівництва, міського господарства
та архітектури
к.т.н., доц.



Наталя Блащук

доцент кафедри
будівництва, міського господарства
та архітектури
к.т.н., доц.

перевищувати одиницю. Частка ростверку у несучій здатності фундаменту збільшується по мірі зростання навантаження, оскільки збільшується тиск під подошвою ростверку. Ступінь реалізації ростверку практично не змінюється для піщаної основи і несуттєво зростає для глинистої. Отже, ростверк поступово включається у роботу, але потенційна можливість ростверку сприймати навантаження реалізується не повністю і при певному значенні осідання залишається сталою.

Оцінено можливість аналізу перерозподілу зусиль між елементами пальової групи тільки на етапі максимально допустимого осідання.

Ключові слова. Фізичне моделювання, математичне моделювання, пальовий фундамент, паля, ростверк, реалізація несучої здатності.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ ТА АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Протягом кількох років на кафедрі БМГА ВНТУ проводяться дослідження перерозподілу зусиль між елементами пальових фундаментів різних типів в залежності від різних факторів: виду фундаменту, довжини і кількості паль, відстані між ними в групі, виду ґрунту основи, тощо [1–4]. Проводились як фізичні дослідження на маломасштабних моделях, так і математичне моделювання в різних програмних комплексах.

На перших етапах досліджень при аналізі перерозподілу зусиль між елементами пальового фундаменту визначались лише частка навантаження, що сприймає ростверк, і відповідно частка навантаження, яку сприймають палі. Пізніше [5] був зроблений висновок, що додатково аналізувати треба ступінь реалізації несучої здатності паль (відношення усередненого навантаження на палю у складі фундаменту до несучої здатності одиночної палі) та ступінь реалізації тиску під подошвою ростверку у порівнянні з реактивним опором під подошвою відповідного фундаменту мілкого закладання. Маючи при проектуванні пальового фундаменту несучу здатність паль, визначену тим чи іншим шляхом, а також розрахунковий опір під подошвою ростверку як фундаменту мілкого закладання, можна за допомогою даних про ступінь реалізації несучої здатності кожного з елементів пальового фундаменту вийти на його сумарну несучу здатність.

Для аналізу у всіх вищенаведених роботах приймалися значення кількісних параметрів ступенів реалізації елементів пальового фундаменту при сталому значенні його осідання. За таке осідання в більшості випадків приймалось найбільше значення осідання фундаменту, а саме $s = 100$ мм. Але з літератури [6] та результатів власних досліджень відомо, що по мірі зростання навантаження на фундамент і відповідно його осідання палі та ростверк поступово включаються у роботу і характер цього включення не є лінійним. Тобто на різних

етапах навантаження ступінь реалізації несучої здатності елементів пальового фундаменту може змінюватись.

МЕТА РОБОТИ

Метою даної роботи є аналіз зміни перерозподілу зусиль між елементами пальового фундаменту при поступовому зростанні навантажень на нього. Це дозволить обґрунтувати вибір критичного значення осідання, для якого доцільно визначати ступінь реалізації несучої здатності елементів пальового фундаменту, що можуть пропонуватись для використання при проектуванні.

В даній роботі такий аналіз виконаний на прикладі стовпчастого пальового фундаменту.

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Фізичне моделювання

В якості вихідних даних для аналізу зміни перерозподілу зусиль між елементами пальового фундаменту при поступовому зростанні навантажень на нього були використані результати досліджень магістрів Малишева О.М. [7] та Кременської Ю.О. [8], які проводили фізичне моделювання груп паль на маломасштабних моделях, та досліджень магістрів Кримняка Я.М. [5] та Кременської Ю.О. [9], що виконували математичне моделювання пальових куців в різних ґрунтових умовах.

При фізичному моделюванні в дослідах Малишева О.М. та Кременської Ю.О. використовувались моделі паль довжиною 3,0; 4,5 та 6,0 м, поперечним перерізом 300х300 мм, виготовлені з деревини. При масштабі моделювання 1:15 дерев'яні моделі мали довжину 200, 300 і 400 мм з поперечним перерізом 20х20 мм. Моделі плити ростверку виготовлялись з залізобетону Товщина моделі плити ростверку прийнята 50 мм, розміри в плані при кроці паль 3d - 200х200 мм (Рис. 1). Максимальна кількість паль у куці 9 штук. (У дослідах Малишева О.М. були використані також моделі для кроків паль 5d та 7d, де d – розмір поперечника палі [3, 7]).

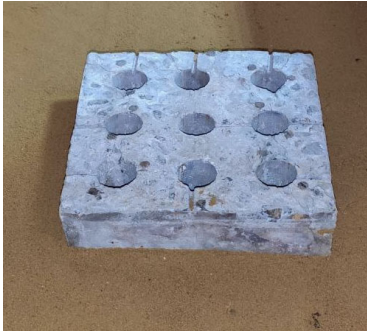


Рис. 1. Модель ростверку 200×200 мм.
Fig.1. Rostwerk model 200×200 mm.

При випробуванні пального фундаменту використовувався лабораторний лоток розміром 1800×1200×1000 мм (Рис. 2). В якості ґрунту використовувався пісок середньої крупності із заданою щільністю та вологістю. Врахувавши геометричні розміри лотка з піском та обмежені можливості упорної системи прийнято масштаб фізичного моделювання 1:15.



Рис. 2. Лоток з ґрунтовою основою під фундамент.
Fig.2. A tray with a soil base for the foundation.

У досліджах Малишева О.М. пісок в лоток насипався з досягненням щільності, що відповідала коефіцієнту пористості $e = 0,6$ (близько до нижньої межі діапазону середньої щільності). Це не дозволило при випробуваннях паливних кушів довести їх до втрати несучої здатності внаслідок обмеженості можливостей упорної системи. Максимальні значення досягнутих осідань при випробуваннях склали близько 14 мм.

В зв'язку з цим у досліджах Кременської Ю.О. пісок в лоток насипався з досягненням щільності, що відповідала коефіцієнту пористості $e = 0,7$ (близько до верхньої межі діапазону середньої щільності). Це дозволило при менших значеннях навантаження досягти практичної втрати стійкості основи при випробуваннях при осіданнях, близьких до 30 мм.

Спеціальні тензометричні наголовники для палів дозволяли визначати зусилля в паях по мірі зростання загального навантаження на куш. Навантаження на ростверк передавалось за допомогою автомобільного домкрату, а для виміру зусилля використовувався динамометр. Навантаження, на яке розрахований домкрат і динамометр, становить до 5 тс.

Для виміру осідання пального фундаменту використовувались два прогиноміри, встановлені на незалежній упорній системі. Система в зборі наведена на Рис. 3.

Проводились також випробування одиночних палів та плити ростверку без палів на поверхні ґрунтового масиву (Рис. 4).

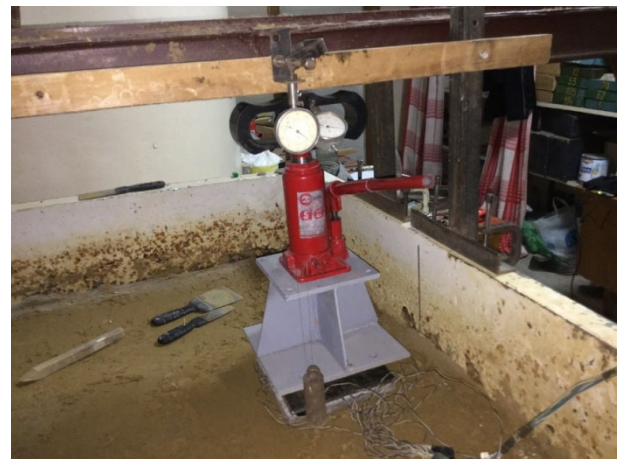


Рис. 3. Модель пального фундаменту перед випробуванням.
Fig.3. Model of the pile foundation before the test.



Рис. 4. Модель випробування плити ростверку.
Fig.4. Test model of rostwerk plate.

Для аналізу розвитку перерозподілу зусиль між елементами пальового фундаменту по мірі зростання навантаження при фізичному моделюванні використовувались результати випробувань куців паль з 9 шт. з кроком $3d$ (ростверк 200×200 мм) з різною довжиною паль. Проаналізовані результати випробувань для піску з коефіцієнтом пористості $e = 0,7$ за дослідями Кремінської Ю.О. та для піску з коефіцієнтом пористості $e = 0,6$ за дослідями Малишева О.М.

В результаті проведення експериментів були одержані графіки залежності осідання – навантаження куца в цілому та графіки залежності сумарної несучої здатності паль від його осідання. Також були одержані графіки осідання – навантаження за результатами випробування одиночних паль різної довжини, графік осідання – навантаження при випробуванні плити ростверку розміром 200×200 мм як штампа без паль.

В роботі Бартоломея А.О. [6] наведені результати натурних досліджень груп паль. Будувались порівняльні графіки розвитку деформацій пальових груп та одиночних паль по мірі зростання навантаження (Рис. 5).

них пальових фундаментів з паль довжиною 6 м (а) і 9 м (б) у піщаних ґрунтах за дослідями Бартоломея А.О. [6]: 1 і 2 – для однорядних пальових фундаментів при високому і низькому ростверках; 3 і 4 – для дворядних пальових фундаментів при високому і низькому ростверках; 0 – для одиночної палі.

Fig.5. The results of field studies of settlement and bearing capacity of one-row and two-row pile foundations with piles 6 m (a) and 9 m (b) long in sandy soils according to the experiments of A.O. Bartholomew [6]: 1 and 2 – for single-row pile foundations with high and low rostwerk; 3 and 4 – for two-row pile foundations with high and low rostwerk; 0 – for a single pile.

Бартоломей А.О. [6] відзначає, що осідання пальових фундаментів при дворядному розміщенні паль у 3,5 – 4,5 рази перевищує осідання одиночних паль. Осідання пальових фундаментів зростають плавно, при осіданнях 25 – 40 мм криві «навантаження – осідання» стрічкових пальових фундаментів перетинають криві «навантаження – осідання» одиночних паль, при цьому для пальових фундаментів не досягнуте граничне навантаження.

Аналогічні графіки розвитку деформацій пальових груп та одиночних паль по мірі зростання навантаження були побудовані за результатами фізичного моделювання для піску з коефіцієнтом пористості $e = 0,7$ за дослідями Кремінської Ю.О. та для піску з коефіцієнтом пористості $e = 0,6$ за дослідями Малишева О.М. (Рис. 6 – 9).

Проведені дослідження дозволили додати до цих графіків ще графік розвитку деформацій осередненого навантаження на палю у складі пальового куца, що дозволяє проаналізувати розвиток реалізації несучої здатності палі при роботі у групі.

Як бачимо результати фізичного моделювання підтверджують висновки Бартоломея А.О., що осідання пальових фундаментів зростають плавно, а при певних осіданнях, які відповідають приблизно граничним осіданням одиночних паль, криві «навантаження – осідання» пальових фундаментів перетинають криві «навантаження – осідання» одиночних паль, при цьому для

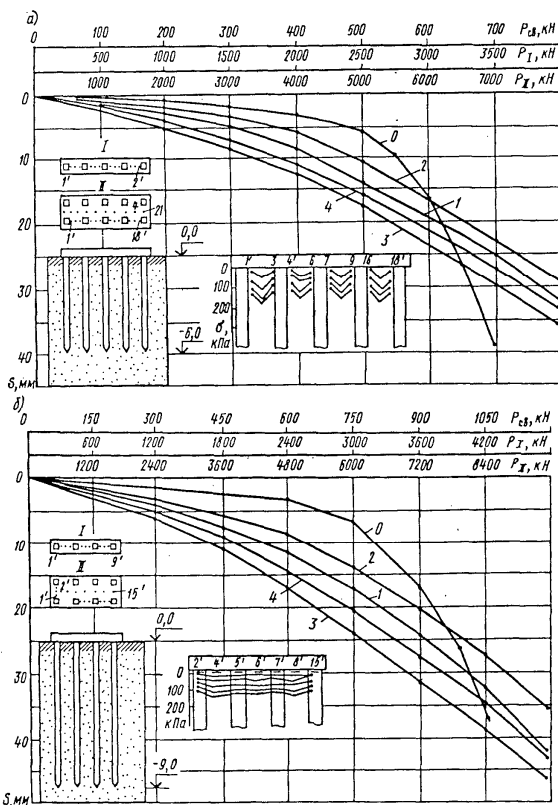


Рис. 5. Результати натурних досліджень осідань і несучої здатності однорядних і дворяд-

пальових фундаментів не досягнуте граничне навантаження.

Паля у складі куща поступово реалізує свою несучу здатність і при значних значеннях осідання сприймає навантаження, більше за граничне навантаження одиначної палі. Отже на певному етапі навантаження ступінь реалізації несучої здатності палі починає перевищувати одиницю.

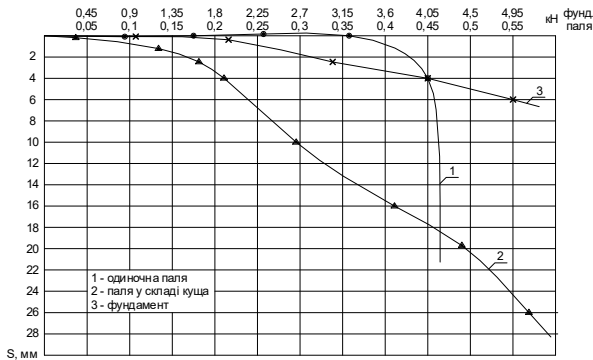


Рис. 6. Результати натурних досліджень осідань і несучої здатності палей і пальових фундаментів з 9 палей довжиною 200 мм у піщаному ґрунті з $e = 0,7$ за дослідями Кремінської Ю.О.

Fig.6. The results of field studies of settlement and bearing capacity of piles and pile foundations with 9 piles 200 mm long in sandy soil with $e = 0.7$ according to the experiments of Yu.O. Kreminska.

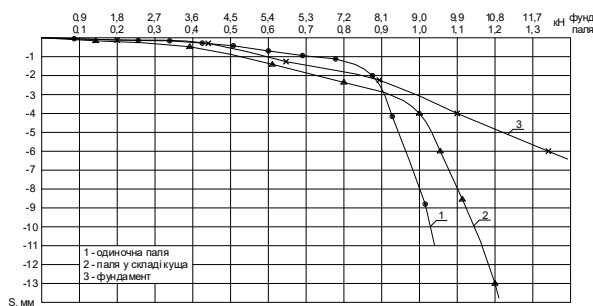


Рис. 7. Результати натурних досліджень осідань і несучої здатності палей і пальових фундаментів з 9 палей довжиною 400 мм у піщаному ґрунті з $e = 0,7$ за дослідями Кремінської Ю.О.

Fig.7. The results of field studies of settlement and bearing capacity of piles and pile foundations with 9 piles 400 mm long in sandy soil with $e = 0.7$ according to the experiments of Yu.O. Kreminska.

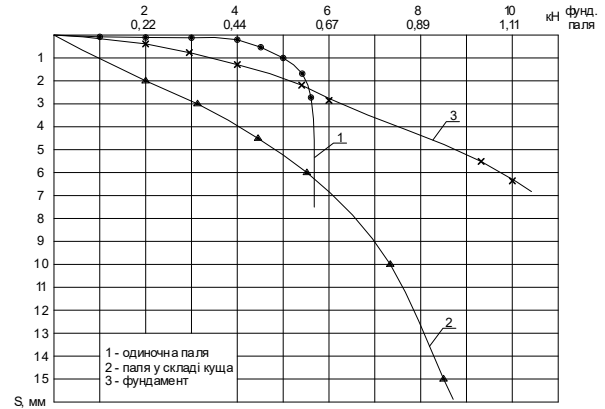


Рис. 8. Результати натурних досліджень осідань і несучої здатності палей і пальових фундаментів з 9 палей довжиною 200 мм у піщаному ґрунті з $e = 0,6$ за дослідями Малишева О.М.

Fig.8. The results of field studies of settlement and non-hewing capacity of piles and pile foundations with 9 piles 200 mm long in sandy soil with $e = 0.6$ according to the experiments of O.M. Malyshev.

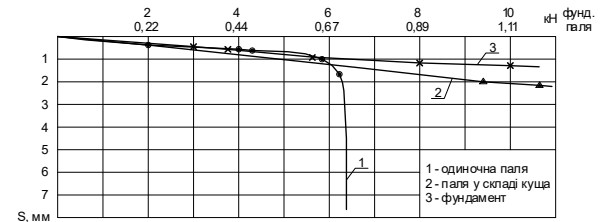


Рис. 9. Результати натурних досліджень осідань і несучої здатності палей і пальових фундаментів з 9 палей довжиною 400 мм у піщаному ґрунті з $e = 0,6$ за дослідями Малишева О.М.

Fig.9. The results of field studies of settlement and bearing capacity of piles and pile foundations with 9 piles 400 mm long in sandy soil with $e = 0.6$ according to the experiments of O.M. Malyshev.

Одержані результати дозволяють для кількісної оцінки характеру перерозподілу зусиль між елементами пальового фундаменту при обробці результатів досліджень проаналізувати такі параметри:

- частка ростверку у навантаженні на пальовий фундамент;
- ступінь реалізації несучої здатності палей при роботі у групі;
- ступінь реалізації тиску під ростверком.

Означені параметри аналізувались на рі-

зних етапах навантаження. результати обробки даних експериментів наведені на Рис. 10 – 12.

Дослідження частки навантаження, що припадає на ростверк, показали, що ростверк включається у роботу при осіданні 0,5 мм. По мірі зростання осідань напруження під подошвою ростверку зростають і досягають максимальних значень при осіданнях 10 – 20 мм. При цьому потенційна можливість ростверку сприймати навантаження реалізується не повністю. В подальшому тиск під ростверком залишається сталим і подальше збільшення несучої здатності пального фундаменту відбувається за рахунок збільшення несучої здатності паль.

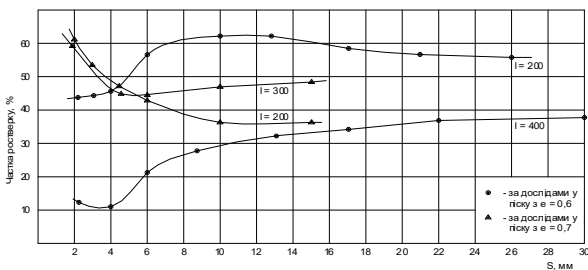


Рис. 10. Графік залежності частки ростверку у навантаженні на паливий фундамент від його осідання по мірі зростання навантаження.

Fig.10. The graph of the dependence of the share of the grating in the load on the pile foundation from its settlement as the load increases.

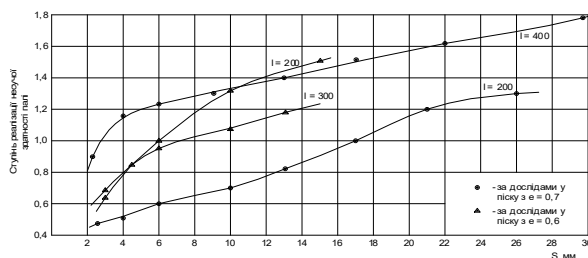


Рис. 11. Графік залежності ступеню реалізації несучої здатності палі у складі фундаменту від його осідання по мірі зростання навантаження.

Fig.11. Graph of the dependence of the degree of implementation of the bearing capacity of the pile as part of the foundation on its settlement as the load increases.

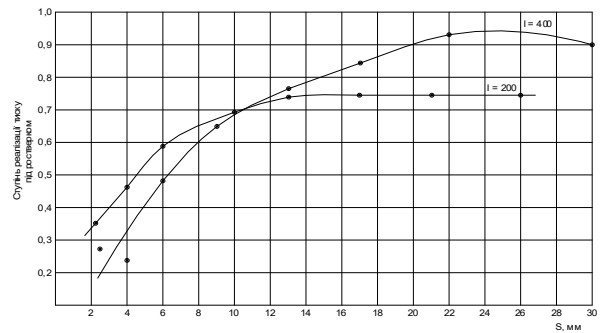


Рис. 12. Графік залежності ступеня реалізації ростверку у складі фундаменту від його осідання по мірі зростання навантаження для основи з піску з коефіцієнтом пористості $e = 0,7$.

Fig.12. Graph of the dependence of the degree of implementation of the rostruck as part of the foundation on its settlement as the load increases for a sand base with a porosity coefficient of $e = 0.7$.

Математичне моделювання

При математичному моделюванні, так само як при фізичному, досліджувався розвиток перерозподілу зусиль між елементами пального фундаменту по мірі зростання навантаження на нього. Дослідження виконувались за допомогою програмного комплексу Plaxis. Розглядався куц з 6 паль довжиною 9,0 м з поперечним перерізом 0,3x0,3м, розміщених з кроком 3d (Рис. 13).

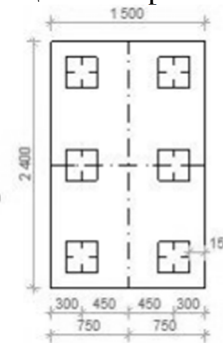


Рис. 13. Схема розміщення паль у ростверку.
Fig.13. The scheme of placing piles in the rostruck.

При математичному моделюванні для початкової експериментальної моделі пального фундаменту були прийняті такі параметри:

- модель ґрунту – пружно-пластична модель Кулона-Мора;

- модель пальового фундаменту під колоною – ростверк розміром в плані 1,5х2,4 м, товщиною 0,9 м і палі поперечного перерізу 0,3 х 0,3 м;
- палі довжиною 9,0 м з кроком 3d;
- величина навантаження, яке сприймається плитою ростверку, розраховується як добуток реактивного опору ґрунту, який знаходиться під підшовою ростверку, на площу ростверку (без врахування площі паль). Ця величина визначалась на декількох етапах навантаження і відповідних осіданнях;
- величина навантаження, яка сприймається палями, розраховується як різниця загального навантаження на стовпчастий пальовий фундамент і величини навантаження, яка сприймається плитою ростверку (також визначалась на декількох етапах навантаження і відповідних осіданнях).

Моделювання сумісної роботи ростверку і паль планується на однорідній піщаній та глинистій основі.

Характеристики піщаного ґрунту: пісок дрібний, $\gamma = 18,6 \text{ кН/м}^3$, $e = 0,67$, $c = 2 \text{ кПа}$, $\varphi = 32^\circ$, $E = 28 \text{ МПа}$. Характеристики глинистого ґрунту: суглинок, $\gamma = 18,5 \text{ кН/м}^3$, $e = 0,75$, $c = 23 \text{ кПа}$, $\varphi = 21^\circ$, $E = 14 \text{ МПа}$.

Додатково до програми моделювання включені такі дослідження:

- моделювання роботи одиночних паль довжиною 9 м з поперечним перерізом 0,3х0,3 м;
- моделювання роботи ростверку розмірами 1,5х2,4 м як фундаменту мілкого закладання.

Для проведення моделювання були прийняті забивні палі із бетону С20/25 (В25).

Розміри змодельованого ґрунтового масиву для максимального зменшення впливу крайових ефектів на осідання палі прийнята в плані 30х30 м, та завтовшки 40 м. Побудована модель ґрунтового масиву показана на Рис. 14. На Рис.15 показана розрахункова модель фундаменту. Величина навантаження на моделі збільшувалась до тих пір, поки величина осідання не становила 10 см.

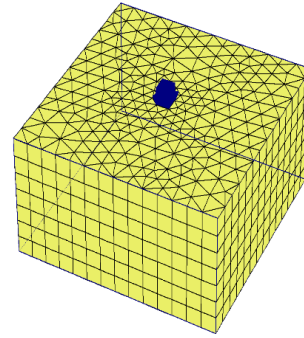


Рис. 14. Розрахункова модель ґрунтового масиву.
Fig.14. Calculation model of the soil massif.



Рис. 15. Розрахункова модель стовпчастого пальового фундаменту з 6 паль у групі.
Fig.15. Calculation model of columnar pile foundation with 6 piles in a group.

В результаті проведення експериментів були одержані графіки залежності осідання – навантаження куца в цілому та графіки залежності сумарної несучої здатності паль від його осідання. Також були одержані графіки осідання – навантаження за результатами випробування одиночної палі, графік осідання – навантаження при випробуванні плити ростверку розміром 1500х2400 мм як штампа без паль.

Для аналізу зміни перерозподілу зусиль між елементами пальового фундаменту були побудовані графіки розвитку деформацій палювих груп, осередненого навантаження на палю у складі пальового куца та одиночних паль по мірі зростання навантаження для двох видів ґрунтів (Рис. 16, 17).

Як бачимо результати математичного моделювання дають картину, якісно аналогічну результатам фізичного моделювання, що осідання палювих фундаментів зростають плавно, а при певних осіданнях, які відповідають приблизно граничним осіданням одиночних паль, криві «навантаження

– осідання» паливових фундаментів перетинають криві «навантаження – осідання» одиночних палів, при цьому для паливових фундаментів не досягнуте граничне навантаження.

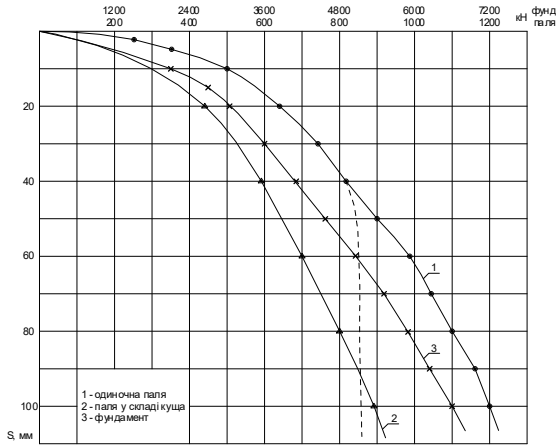


Рис. 16. Графіки розвитку деформацій паливової групи, осередненого навантаження на палу у складі паливового куща та одиночних палів по мірі зростання навантаження для піщаної основи.

Fig.16. Graphs of the development of deformations of the pile group, the average load on the pile as part of a pile bush and single piles as the load increases for a sandy base.

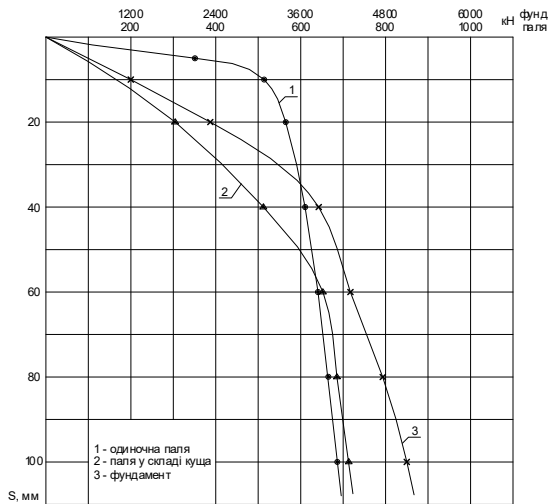


Рис. 17. Графіки розвитку деформацій паливових груп, осередненого навантаження на палу у складі паливового куща та одиночних палів по мірі зростання навантаження для глинистої основи.

Fig.17. Graphs of the development of deformations of pile groups, the average load on a pile as part of a pile bush and single piles as the load increases for a clay base.

Пала у складі куща поступово реалізує свою несучу здатність і при значних значеннях осідання сприймає навантаження, більше за граничне навантаження одиночної палі. Отже на певному етапі навантаження ступінь реалізації несучої здатності палі починає перевищувати одиницю.

Для кількісної оцінки характеру перерозподілу зусиль між елементами паливового фундаменту по мірі зростання навантаження при обробці результатів досліджень аналізувались такі ж параметри, що і при фізичному моделюванні:

- частка ростверку у навантаженні на паливовий фундамент;
- ступінь реалізації несучої здатності палів при роботі у групі;
- ступінь реалізації тиску під ростверком.

Результати обробки даних досліджень представлені у таблицях 1 та 2 та на Рис. 18 – 20.

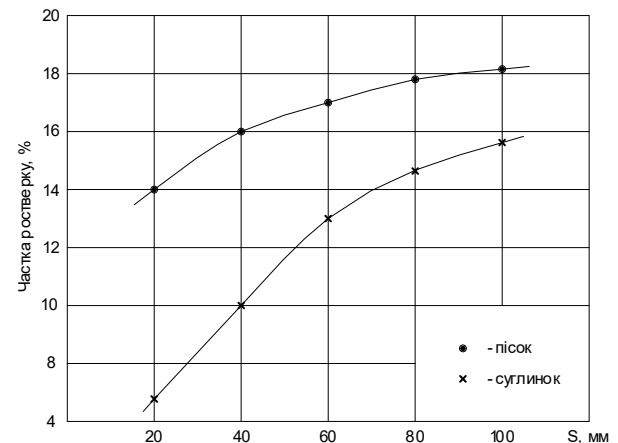


Рис. 18. Графік залежності частки ростверку у навантаженні на паливовий фундамент від величини осідання.

Fig.18. The graph of the dependence of the share of the grid in the load on the pile foundation on the amount of settlement.

Табл. 1. Результати досліджень перерозподілу зусиль між елементами пальового фундаменту по мірі зростання навантаження для піщаного ґрунту
 Table 1. The results of studies on the redistribution of forces between the elements of the pile foundation as the load increases for sandy soil

Осідання s, мм	Навантаження на куцц, кН	Осереднене навантаження на палю у складі фундаменту, кН	Несуча здатність одиночної палі, кН	Навантаження, що сприймає ростверк, кН	Навантаження, що сприймає плита ростверку без палй, кН	Ступінь реалізації несучої здатності палй	Ступінь реалізації несучої здатності ростверку	Частка несучої здатності ростверку
20	3060	438	830	428	1065	0,53	0,40	0,14
40	4140	578	830	673	1768	0,70	0,38	0,16
60	5076	701	830	872	2180	0,84	0,40	0,172
80	5886	808	830	1037	2800	0,97	0,37	0,176
100	6588	898	830	1200	3276	1,08	0,366	0,182

Табл. 2. Результати досліджень перерозподілу зусиль між елементами пальового фундаменту по мірі зростання навантаження для глинистого ґрунту
 Table 2. The results of studies on the redistribution of forces between the elements of the pile foundation as the load increases for clay soil

Осідання s, мм	Навантаження на куцц, кН	Осереднене навантаження на палю у складі фундаменту, кН	Несуча здатність одиночної палі, кН	Навантаження, що сприймає ростверк, кН	Навантаження, що сприймає плита ростверку без палй, кН	Ступінь реалізації несучої здатності палй	Ступінь реалізації несучої здатності ростверку	Частка несучої здатності ростверку
20	2322	364	600	135	1360	0,607	0,100	0,058
40	3744	563	600	364	2000	0,938	0,182	0,097
60	4356	631	600	572	2500	1,052	0,229	0,131
80	4770	678	600	701	2920	1,13	0,240	0,147
100	5112	719	600	796	3276	1,20	0,240	0,156

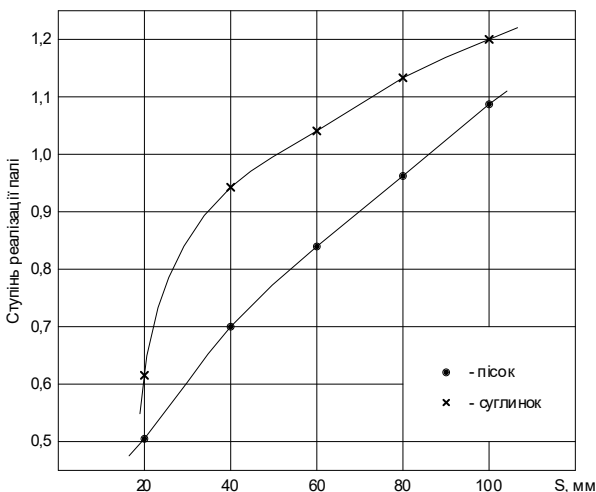


Рис. 19. Залежність ступеня реалізації несучої здатності палй у складі пальового фундаменту від величини осідання.

Fig.19. Dependence of the degree of implementation of the load-bearing capacity of piles in the composition of the pile foundation on the amount of subsidence.

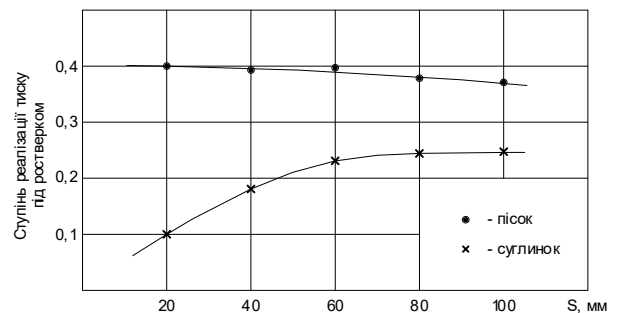


Рис. 20. Залежність ступеня реалізації тиску під подошвою ростверку у складі стовпчастого пальового фундаменту від величини осідання.

Fig.20. Dependence of the degree of realization of pressure under the sole of the rostverk in the composition of the columnar pile foundation on the amount of subsidence.

Як бачимо частка ростверку у несучій здатності фундаменту збільшується по мірі зростання навантаження, оскільки збільшується тиск під подошвою ростверка. Ступінь

реалізації ростверка практично не змінюється для піщаної основи і несуттєво зростає для глинистої. Отже, ростверк поступово включається у роботу, але потенційна можливість ростверка сприймати навантаження реалізується не повністю і при певному значенні осідання залишається сталою.

Паля у складі куца, як і при фізичному моделюванні, поступово реалізує свою несучу здатність і при значних значеннях осідання сприймає навантаження, більше за граничне навантаження одиночної палі. Отже, на певному етапі навантаження ступінь реалізації несучої здатності палі починає перевищувати одиницю.

Ростверк краще реалізує себе у піщаному ґрунті, а палі – у глинистому, але якісний характер зміни ступеня реалізації паль і ростверку по мірі зростання навантаження для піщаних і глинистих ґрунтів аналогічний.

За критичне значення осідання, для якого доцільно визначати ступені реалізації несучої здатності елементів пальового фундаменту, що можуть пропонуватись для використання при проєктуванні, можна приймати максимальне значення осідання фундаменту, але при цьому до визначення ступеня реалізації палі треба ставитись з обережністю, без надмірного його завищення.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Паля у складі куца, як за результатами фізичного моделювання, та і за результатами математичного моделювання, поступово реалізує свою несучу здатність по мірі зростання навантаження і при значних значеннях осідання сприймає навантаження більше за граничне навантаження одиночної палі. Отже на певному етапі навантаження ступінь реалізації несучої здатності палі починає перевищувати одиницю.

2. Частка ростверку у несучій здатності фундаменту збільшується по мірі зростання навантаження, оскільки збільшується тиск під подошвою ростверку. Ступінь реалізації ростверку практично не змінюється

для піщаної основи і несуттєво зростає для глинистої. Отже, ростверк поступово включається у роботу, але потенційна можливість ростверку сприймати навантаження реалізується не повністю і при певному значенні осідання залишається сталою.

3. Для аналізу характеру перерозподілу зусиль між елементами пальового фундаменту може бути використане моделювання у програмному комплексі Plaxis 3D Foundation.

4. За критичне значення осідання, для якого доцільно визначати ступені реалізації несучої здатності елементів пальового фундаменту, що можуть пропонуватись для використання при проєктуванні, можна приймати максимальне значення осідання фундаменту, але при цьому до визначення ступеня реалізації палі треба ставитись з обережністю, без надмірного його завищення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Маєвська І.В. Урахування роботи ростверку у складі стрічкових пальових та підсиленних палями фундаментів: монографія. / І.В. Маєвська, Н.В. Блащук // Вінниця: ВНТУ, – 2013. – 168 с.
2. Маєвська І.В. Вплив виду ґрунту на сумісну роботу паль і ростверка в кущовому пальовому фундаменті. / І.В. Маєвська, Н.В. Блащук, К.А. Чобанова // *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. Науково-технічний збірник ВНТУ.* – Вінниця: УНІВЕРСМ-Вінниця. – 2013. №2. – С.40-47.
3. Блащук Н.В. Перерозподіл зусиль між елементами стовпчастого пальового фундаменту. / Н.В. Блащук, І.В. Маєвська, М.М. Попович // *Сучасні технології, матеріали та конструкції в будівництві: міжнародний н/т журнал ВНТУ.* – Вінниця: ВНТУ. – 2018. – №1(24). – С. 36-44.
4. Маєвська І.В. Перерозподіл зусиль між елементами однорядного стрічкового пальового фундаменту. / І.В. Маєвська, Н.В. Блащук // *Сучасні технології, матеріали та конструкції в будівництві: міжнародний н/т журнал ВНТУ.* – Вінниця: ВНТУ. – 2019. – №1(26). – С.43-52.
5. Кримняк Я.М. Робота забивних паль і ростверку у складі стовпчастого пальового фундаменту. / Я.М. Кримняк, І.В. Маєвська //

- Тези Всеукраїнської науково-практичної Інтернет-конференція студентів, аспірантів та молодих науковців «МОЛОДЬ В НАУЦІ: ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРОБЛЕМИ, ПЕРСПЕКТИВИ (МН-2021)»*. – Вінниця: ВНТУ. – 2021. – URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2021/paper/view/11077>.
6. Бартоломей А.А. Прогноз осадок свайных фундаментов / А.А. Бартоломей, И.М. Омелчак, Б.С. Юшков – М., Стройиздат, 1994. 384 с.
 7. Малишев О.М. Сумісна робота паль і ростверку у стовпчастому пальовому фундаменті. / О.М. Малишев, С.О. Цимбал, І.В. Маєвська, Н.В.Блашук // *Молодь в науці: тез. регіон. наук.-практ. інтернет-конф. студентів, аспірантів та молодих науковців ВНТУ, м. Вінниця, 2 січ. 2018.* – Вінниця: ВНТУ. – 2018. – URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2018/paper/viewFile/3694/31033103>.
 8. Кремінська Ю.О. Фізичне моделювання пальових кушів з короткими та довгими палями. / Ю.О. Кремінська, І.В. Маєвська // *Енергоефективність в галузях економіки України-2021: міжнар. наук.-техн. конф., м. Вінниця, 23-25 листоп. 2021р.* – Вінниця: ВНТУ. – 2021. – URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egeu/egeu2021/paper/view/13939>.
 9. Маєвська І.В. Особливості роботи пальових кушів з коротких паль за даними числового моделювання. / І.В. Маєвська, Н.В. Блашук, Ю.О. Кремінська // *Основи та фундаменти: науково-технічний збірник.* – К.: КНУБА. – 2021. – Вип.43. – С.30-39.
 10. Блашчук Н.В., Маєвська І.В., Попович М.М. (2018). Pererозpodil zusyl' mizh elementamy stovpchastoho pal'ovoho fundamentu [Redistribution of forces between the elements of the columnar pile foundation]. *Suchasni tekhnolohiyi, materialy ta konstruktsiyi v budivnytstvi: mizhnarodnyy n/t zhurnal VNTU*. Vinnytsya: VNTU, №1(24), 36-44. (in Ukrainian).
 11. Маєвська І.В., Блашчук Н.В. (2019). Pererозpodil zusyl' mizh elementamy odnoryadnoho strichkovo-ho pal'ovoho fundamentu [Redistribution of forces between elements of a single-row strip pile foundation]. *Suchasni tekhnolohiyi, materialy ta konstruktsiyi v budivnytstvi: mizh-narodnyy n/t zhurnal VNTU*. Vinnytsya: VNTU, №1(26), 43-52. (in Ukrainian).
 12. Krymnyak Y.M., Maievska I.V. (2021). The operation of driven piles and grillwork as part of a columnar pile foundation [The operation of driven piles and grillwork as part of a columnar pile foundation]. *Abstracts of the All-Ukrainian scientific-practical Internet conference of students, postgraduates and young scientists "YOUTH IN SCIENCE: RESEARCH, PROBLEMS, PROSPECTS (MN-2021)*. Vinnytsia: VNTU. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2021/paper/view/11077>. (in Ukrainian).
 13. Bartolomey A.A., Omelchak I.M., Yushkov B.S. (1994). Prognoz osadok svaynykh fundamentov [Forecast sediment pile foundation]. Moskva: Strojizdat, 384 (in Russian).
 14. Malyshev O.M., Tsybmal S.O., Maievska I.V., Blashchuk N.V. (2018). Sumisna robota pal i rost-verku u stovpchastomu palovomu fundamenti [Joint work of piles and a grid in the columnar pile basement]. *Molod v nauksi: tez. rehion. nauk.-prakt. inter-net-konf. studentiv, aspirantiv ta molodykh nau-kovtsiv VNTU, Vinnytsia, 02.01.2018.* Vinnytsya: VNTU. - URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2018/paper/viewFile/3694/31033103>. (in Ukrainian).
 15. Kreminska Yu.O., Maievska I.V. (2021). Fizychnе modeliuвання palovykh kushchiv z korotkymy ta dovhymy paliamy [Physical modeling of pile bushes with short and long piles]. *Enerhoefektyvnist v haluziakh ekonomiky Ukrainy-2021: mizhnar. nauk.-tekhn. konf.*, budivnytstvi. *Naukovo-tekhnichnyy zbirnyk VNTU*. Vinnytsya: UNIVERSM-Vinnytsya. №2. 40-47. (in Ukrainian).

REFERENCES

1. Maievs'ka I.V., Blashchuk N.V. (2013). Urakhuvannya roboty rostverku u skladi strichkovykh pal'ovykh ta pidsylenykh palyamy fundamentiv: monohrafiya [Taking into account the operation of the grid in the composition of strip pile and pile-reinforced foundations: monograph]. Vinnytsya: VNTU, 168. (in Ukrainian).
2. Maievs'ka I.V., Blashchuk N.V., Chobanova K.A. (2013). Vplyv vydu gruntu na sumisnu robotu pal' i rostverka v kushchovomu pal'ovomu fundamenti [The influence of the type of soil on the joint operation of piles and grid in a bush pile foundation]. *Suchasni tekhnolohiyi, materialy i konstruktsiyi v*

Vinnytsia, 23-25.11.2021. Vinnytsya: VNTU.
URL:

<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egeu/egeu2021/paper/view/13939>. (in Ukrainian).

9. Mayevs'ka I.V., Blashchuk N.V., Kremins'ka YU.O. (2021). Osoblyvosti roboty pal'ovykh kushchiv z korotkykh pal' za danymy chyslovoho modelyuvannya [Peculiarities of the operation of pile bushes from short piles according to numerical simulation data]. *Osnovy ta fundamenty: naukovo-tekhnichnyy zbirnyk*. Kyiv: KNUBA, 43, 30-39. (in Ukrainian).

Changing the redistribution of forces between pile foundation elements as the load increases

*Irina Maevska,
Natalya Blashchuk*

Summary. Having, during the design of the pile foundation, the load-bearing capacity of the piles determined in one way or another, as well as the calculated resistance under the sole of the rostwerk as a shallow foundation, it is possible to use data on the degree of implementation of the load-bearing capacity of each of the elements of the pile foundation to arrive at its total load-bearing capacity. But it is known that at different stages of loading, the degree of implementation of the load-bearing capacity of the elements of the pile foundation can change.

The purpose of this work is to analyze the change in the redistribution of forces between the elements of the pile foundation with a gradual increase in the loads on it. This will make it possible to justify the selection of the critical value of settlement, for which it is appropriate to determine the degrees of implementation of the load-bearing capacity of the elements of the pile foundation, which can be proposed for use in the design.

The analysis of changes in the redistribution of forces between the elements of the pile foundation with a gradual increase in loads on it was performed for the bush pile foundation based on physical modeling on small-scale models, as well as mathematical modeling using the Plaxis software complex.

It was established that the pile in the composition of the bush, both according to the results of physical modeling and mathematical modeling, gradually realizes its load-bearing capacity as the load increases and, with significant values of set-

tlement, perceives the load, more than the limit load of a single pile.

Therefore, at a certain stage of loading, the degree of implementation of the bearing capacity of the pile begins to exceed unity. The share of the rostwerkwork in the load-bearing capacity of the foundation increases as the load increases, as the pressure under the sole of the rostwerkwork increases. The degree of implementation of the rostwerk practically does not change for a sandy base and increases insignificantly for a clay base. So, the rostwerk is gradually included in the work, but the potential ability of the rostwerk to perceive the load is not fully realized and at a certain value of settlement remains constant.

The possibility of analyzing the redistribution of forces between elements of the pile group only at the stage of the maximum allowable settlement was evaluated.

Key words. Physical modeling, mathematical modeling, pile foundation, pile, grid, implementation of bearing capacity.