

## Особливості взаємодії бурової палі з ґрунтовою основою при наявності структурно-нестійких ґрунтів

Ігор Бойко<sup>1</sup>, Віктор Носенко<sup>2</sup>, Олег Кривенко<sup>3</sup>,  
Київський національний університет будівництва і архітектури  
31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037,  
<sup>1</sup> boyko.ip@knuba.edu.ua, orcid.org/ 0000-0002-6841-0271  
<sup>2</sup> nosenko.vs@knuba.edu.ua, orcid.org/ 0000-0002-8261-1846  
<sup>3</sup> kryvenko.oa@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0002-1999-2770

DOI: 10.32347/0475-1132.47.2023.115-123

**Анотація.** При зведенні пальових фундаментів процес випробування паль є необхідним та обов'язковим. Через це присутня необхідність у коректній оцінці взаємодії елементів системи «основа-паля» з метою отримання надійного та ефективного проектного рішення.

Якщо використовувати параметри ґрунту надані у звітах з інженерно-геологічних вишукувань, без їх попереднього уточнення, то це призводить до значної розбіжності у результатах числового моделювання взаємодії паль з основою та даних з натурних випробувань. У зв'язку з цим є необхідність у ідентифікації розрахункових параметрів прийнятої моделі ґрунту з метою збіжності результатів моделювання з результатами експериментальних досліджень в широкому діапазоні навантажень.

Для опису поведінки взаємодії елементів системи «основа-паля» у даній роботі була обрана модель Hardening Soil Model. Було досліджено характер впливу трьох модулів, що задаються у вище зазначеній моделі: модуль деформації при міцності ґрунту 50% ( $E_{50}^{ref}$ ); компресійний модуль деформації ( $E_{oed}^{ref}$ ); модуль деформації при розвантаженні ( $E_{ur}^{ref}$ ). Також проаналізовано вплив ефекту дилатансії піщаного ґрунту.

При початковому етапі навантажень суттєвий вклад в її роботу вносить значення модулів  $E_{50}^{ref}$  та  $E_{oed}^{ref}$ . При подальшому збільшенні навантаження в ґрунті виникають значні пластичні деформації зсуву, а відповідно ведучими параметрами є параметри міцності ґрунту ( $c$ ,  $\phi$ ). Через те що у верхній частині бурова паля знаходяться структурно-нестійких ґрунтах (насіпний ґрунт та супісок пластичний), а нижня її частина на значній своїй довжині влаштована в межах піщаного ґрунту то важливим також є врахування



**Ігор Бойко**  
професор кафедри  
геотехніки,  
д.т.н.



**Віктор Носенко**  
завідувач кафедри  
геотехніки, доцент,  
к.т.н.



**Олег Кривенко**  
асистент кафедри  
геотехніки

ефекту дилатансії( $\psi$ ) ґрунту.

Виявлено що збільшення модуля розвантаження ( $E_{ur}^{ref}$ ) зменшує не тільки осідання по кривій розвантаження, а і по кривій навантаження.

Наведені результати порівняння натурального випробування бурової палі та її числового моделювання взаємодії з структурно-нестійкими та піщаними ґрунтами та виконана ідентифікація розрахункових параметрів моделі ґрунтового середовища з метою збіжності результатів моделювання з експериментальними даними при відповідних заданих навантаженнях.

Отримана збіжність в межах до 5% в широкому діапазоні по кривій навантаження на бурову палу.

**Ключові слова.** Бурова паля, випробування

палі, ідентифікація параметрів, числове моделювання, модуль розвантаження, кут дилатансії.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

У зв'язку із збільшенням тенденції на зведення будівель і споруд, що мають велике вертикальне навантаження, поряд із вже існуючими пальові фундаменти отримали значний попит. На даний час серед паль широкого впровадження здобули бурові (буроін'єкційні та буронабивні) діаметром в діапазоні 420-1020мм.

Для того щоб провести моделювання роботи бурової палі з ґрунтовим масивом необхідно попередньо провести випробування її на вертикальне вдавлююче статичне навантаження та додатково отримати від інженерів-геологів дані по ґрунтам (фізико-механічні та деформативні властивості). Якщо під час моделювання системи «основа – бурова паля» на пряму використати отримані із звітів характеристики ґрунтів то у переважній більшості випадків виникає значна розбіжність між даними моделювання та польового випробування у напрямку значного збільшення осідання при відповідному навантаженні, через це виникає необхідність обрати адекватну модель для оцінки взаємодії елементів системи «основа - паля» при числовому моделюванні. Збіжність результатів моделювання і випробування у широкому діапазоні навантажень досягається шляхом ідентифікування розрахункових параметрів моделі ґрунту.

В даній роботі при числовому моделюванні була використана модель роботи ґрунту під назвою Hardening Soil Model (опис моделі див. [1]), яка включає в себе такі наступні розрахункові параметри: питому вагу( $\gamma$ ), модуль деформації при міцності ґрунту 50% ( $E_{50}^{ref}$ ); компресійний модуль деформації ( $E_{oed}^{ref}$ ); модуль деформації при розвантаженні ( $E_{ur}^{ref}$ ); показник ступеня залежності жорсткості від рівня навантаження ( $m$ ); коеф. Пуассона( $\nu$ ); питоме зчеплення( $c$ ), кут внутрішнього тертя( $\phi$ ), кут дилатансії( $\psi$ ). Вище вказані параметри необхідно підібрати так, щоб збіжність результатів моделювання та випробування була в межах

5-10%. Така збіжність в подальшому дає можливість отримати більш достовірні переміщення фундаментів і дозволяє відтворити більш реальну картину перерозподілу зусиль у несучих конструкціях не тільки фундаментів, а й каркасу будівлі в цілому що в свою чергу забезпечує надійне проектне рішення.

## АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Верифікацією параметрів для моделі ґрунту Hardening Soil model [1] займався Schanz Т. Процесом взаємодії палі з ґрунтовим масивом займалися Бойко І.П. та Карпенко Ю.В [2], Катценбах Р. [3], Зоценко М.Л. [4]. Також у попередньому випуску даного збірника [5] автори Бойко І.П. та Кривенко О.А. розглянули числове моделювання взаємодії бурової палі з врахуванням дилатансії ґрунту.

## МЕТА РОБОТИ

При наявності структурно-нестійких ґрунтів оцінити вплив величин розрахункових параметрів моделі ґрунту (Hardening Soil Model), що застосовуються при числовому моделюванні взаємодії елементів системи «основа-паля» та виконуючи ідентифікацію цих параметрів досягнути збіжності результатів натурного випробування палі та моделювання у широкому діапазоні навантажень. Відтворити через числове моделювання криву розвантаження бурової палі.

## ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

В якості дослідної палі розглядається бурова паля діаметром 1,02м та довжиною 25,3м.

Ґрунтовий масив на будівельному майданчику має наступні напластування шарів:

- ІГЕ-1 – насипний ґрунт;
- ІГЕ-2а – супісок пластичний;
- ІГЕ-16 – пісок дрібний, щільний;
- ІГЕ-19 – суглинок м'якопластичний.

Посадка бурової палі на інженерно-геологічний представлена на рис.1.

У лабораторних умовах було визначено фізико-механічні властивості ґрунтів, які наведені у таблиці 1.

Табл. 1. Фізико-механічні властивості ґрунтів із звіту інженерно-геологічних вишукувань.  
Tab. 1. Physical and mechanical properties of soils from the report of engineering and geological surveys.

| □□□<br>кН/м <sup>3</sup>                   | Коеф. Пуассона | Кут внутр. тертя, ° | Питоме зчеплення, кПа | Модуль деформації, МПа |
|--|----------------|---------------------|-----------------------|------------------------|
|  | $\nu$          | $\phi$              | $c$                   | $E$                    |
| <b>ІГЕ - 1 (насипний ґрунт)</b>            |                |                     |                       |                        |
| 16.7                                       | 0.3            | 22                  | 7                     | 5                      |
| <b>ІГЕ - 2а (супісок пластичний)</b>       |                |                     |                       |                        |
| 19.6                                       | 0.35           | 24                  | 16                    | 11                     |
| <b>ІГЕ - 16 (пісок дрібний, щільний)</b>   |                |                     |                       |                        |
| 20.5                                       | 0.3            | 32                  | 1                     | 57                     |
| <b>ІГЕ - 19 (суглинок м'якопластичний)</b> |                |                     |                       |                        |
| 20.0                                       | 0.38           | 27                  | 59                    | 29                     |

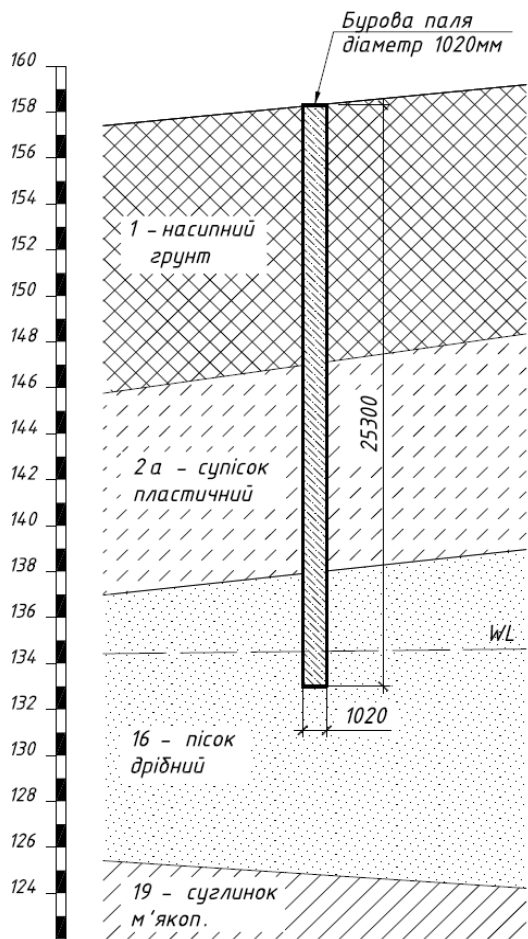


Рис.1. Посадка бурової палі на інженерно-геологічний розріз.

Fig.1. Engineering-geological section with the planting of a bored pile.

Також було проведено статичне зондування на глибину 39,0м комплектом апаратури «Icône and Icontrol» компанії А.Р. van Berg, що включає в себе зонд СРГі: вимірювалась сила опору ґрунту під конусом зонду (qc) та сила тертя ґрунту по боковій поверхні зонду (fs). Результати зондування наведено на рис.2.

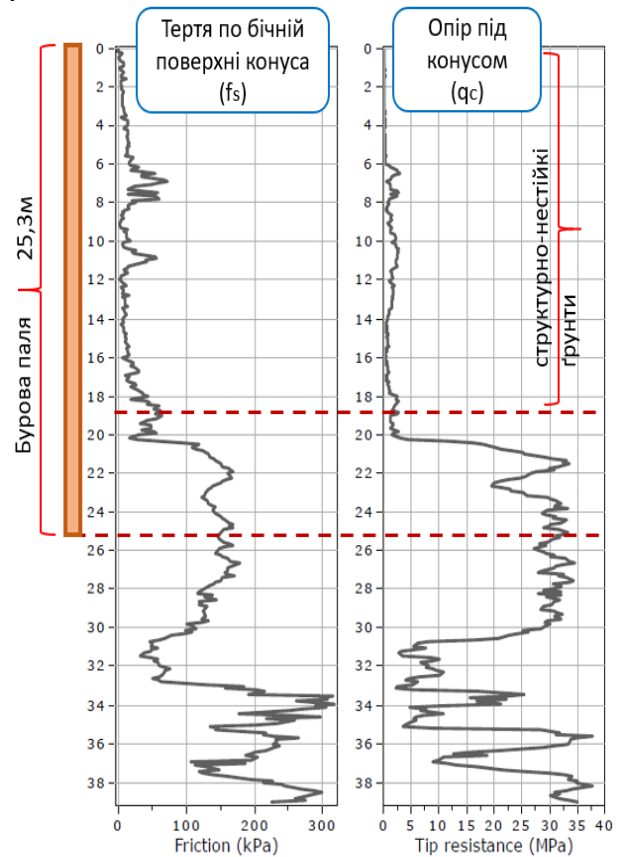


Рис.2. Результати статичного зондування.

Fig.2. Data of the static sensing.

Треба зазначити, що в верхній частині бурової палі на довжині 18м знаходяться структурно-нестійкі ґрунти – насипні ґрунти та супіски пластичні з низьким опором згідно даних статичного зондування(див. рис.2), через що несуча здатність палі по бічній поверхні в цій зоні є мінімальною.

Скінчено-елементна модель взаємодії бурової палі (діаметр 1,02м; довжина 25,3м) і оточуючого ґрунтового масиву представлена у вісесиметричній постановці. В якості скінченних елементів обрані 15-ти вузлові скінченні елементи. За вертикальним розрізом розрахункова модель має наступні габарити: ширина становить 10d(10,2м), а по висоті 35,5м з яких 10d(10,2м) під п'ятою бурової палі. Загальна кількість скінченних

елементів – 449шт., вузлів – 3739шт. Розрахункова схема наведена нижче на рис. 4 [5]. Матеріал палі задано з модулем пружності  $E=30 \cdot (10^6)$ кПа, та коефіцієнтом Пуассона що становить  $\nu = 0,2$ . Бурова паля спірається своєю п'ятою у ІГЕ-16 (пісок дрібний).

У попередній статті [5], при числовому моделюванні була використана ідеально-пружно-пластична модель роботи ґрунту з умовою міцності Кулона-Мора. Дана модель шляхом ідентифікації параметрів дозволила наблизити криву навантаження палі до результатів випробування. А от криву розвантаження повторити моделюванням не вдалось. Через це було прийнято рішення змінити розрахункову модель на Hardening Soil Model (HSM), яка вже має такий додатковий параметр як модуль розвантаження.

Для кожного ґрунту у розрахунковій моделі системи «основа - бурова паля» необхідно задати наступні параметри:

- 1) Питома вага ( $\gamma$ ), кН/м<sup>3</sup>;
- 2) Модуль деформації при міцності ґрунту 50% ( $E_{50}^{ref}$ ), МПа;
- 3) Компресійний модуль деформації ( $E_{oed}^{ref}$ ), МПа;
- 4) Модуль деформації при розвантаженні ( $E_{ur}^{ref}$ ), МПа;
- 5) Показник ступеня залежності жорсткості від рівня навантаження (m);
- 6) Коефіцієнт Пуассона ( $\nu$ );
- 7) Питоме зчеплення (c), кПа;
- 8) Кут внутрішнього тертя ( $\phi$ ), градуси;
- 9) Кут дилатансії ( $\psi$ ), градуси (для піщаних ґрунтів).

При моделюванні ступені навантаження палі відповідають ступеням при статичному випробуванні. Випробування палі було доведено до граничного навантаження що становить 1504т.

Для початку розглянемо як саме впливають на відтворення експериментальних даних через числове моделювання такі параметри як модуль деформації при розвантаженні ( $E_{ur}^{ref}$ ) та кут дилатансії ( $\psi$ ). Для цього нижче наведено варіанти підбору параметрів ґрунтів 1, 2, та 3 (дивись табл. 2). Примітка: вплив модулів  $E_{50}^{ref}$  та  $E_{oed}^{ref}$  буде розглянуто далі у статті.

Табл. 2. Початковий етап ідентифікації параметрів ґрунтів.

Tab. 2. The initial stage of identifying soil parameters.

| Варіант_1             | Коеф. | ІГЕ |    |     |     |
|-----------------------|-------|-----|----|-----|-----|
|                       |       | 1   | 2а | 16  | 19  |
| $E_{50}^{ref}$ , МПа  | 1     | 5   | 11 | 57  | 29  |
| $E_{oed}^{ref}$ , МПа | 1     | 5   | 11 | 57  | 29  |
| $E_{ur}^{ref}$ , МПа  | 2     | 10  | 22 | 114 | 58  |
| c, кПа                | 1     | 7   | 16 | 1   | 59  |
| $\phi$ , град.        | 1     | 22  | 24 | 32  | 27  |
| $\psi$ , град.        | 6     | -   | -  | 6   | -   |
| Варіант_2             | Коеф. | ІГЕ |    |     |     |
|                       |       | 1   | 2а | 16  | 19  |
| $E_{50}^{ref}$ , МПа  | 1     | 5   | 11 | 57  | 29  |
| $E_{oed}^{ref}$ , МПа | 1     | 5   | 11 | 57  | 29  |
| $E_{ur}^{ref}$ , МПа  | 8     | 40  | 88 | 456 | 232 |
| c, кПа                | 1     | 7   | 16 | 1   | 59  |
| $\phi$ , град.        | 1     | 22  | 24 | 32  | 27  |
| $\psi$ , град.        | 6     | -   | -  | 6   | -   |
| Варіант_3             | Коеф. | ІГЕ |    |     |     |
|                       |       | 1   | 2а | 16  | 19  |
| $E_{50}^{ref}$ , МПа  | 1     | 5   | 11 | 57  | 29  |
| $E_{oed}^{ref}$ , МПа | 1     | 5   | 11 | 57  | 29  |
| $E_{ur}^{ref}$ , МПа  | 2     | 10  | 22 | 114 | 58  |
| c, кПа                | 1     | 7   | 16 | 1   | 59  |
| $\phi$ , град.        | 1     | 22  | 24 | 32  | 27  |
| $\psi$ , град.        | 11    | -   | -  | 11  | -   |

На першому етапі розрахунків (варіант 1) було проведено числове моделювання взаємодії бурової палі з ґрунтовою основою з використанням прямих значень параметрів наданих у звіті з інженерно-геологічних вишукувань. Але враховуючи той факт, що у звіті був наданий один модуль (E), а для числового моделювання використовуючи модель Hardening Soil Model (HSM) необхідно вказати три модулі ( $E_{50}^{ref}$ ,  $E_{oed}^{ref}$ ,  $E_{ur}^{ref}$ ), то на основі досвіду були прийняті наступні співвідношення:  $E_{50}^{ref} = E_{oed}^{ref} = E$ ;  $E_{ur}^{ref} = 2 \cdot E_{50}^{ref}$ . Початковий кут дилатансії був прийнятий рівним  $\psi = 6^0$ , бо при меншому значенні ґрунт руйнувався і задача не рахувалася. Показник ступеня залежності жорсткості від

рівня навантаження ( $m$ ) для вище вказаних шарів ґрунтів заданий наступний: 0,5 – ІГЕ-1 (насіпний ґрунт); 0,6 – ІГЕ-2а (супісок пластичний); 0,5 – ІГЕ-6 (пісок дрібний, щільний); 0,7 – ІГЕ-19 (суглинок м'якопластичний). Вище вказані параметри відображені у табл. 2, а результат розрахунку на рис. 3 (варіант 1).

Видно, що початкові параметри за варіантом 1 призводять до значної переоцінки осідання палі (рис. 3) в межах робочого

діапазону навантажень до 3,5 разів, а при максимальному граничному навантаженні до 4 разів більше осідання отримане за розрахунком (76,99мм) ніж фактично виміряне в умовах польового випробування палі статичним вдавлюючим навантаженням (19,5мм). Загальне підняття палі від повного завантаження до повного розвантаження становить 23,51мм.

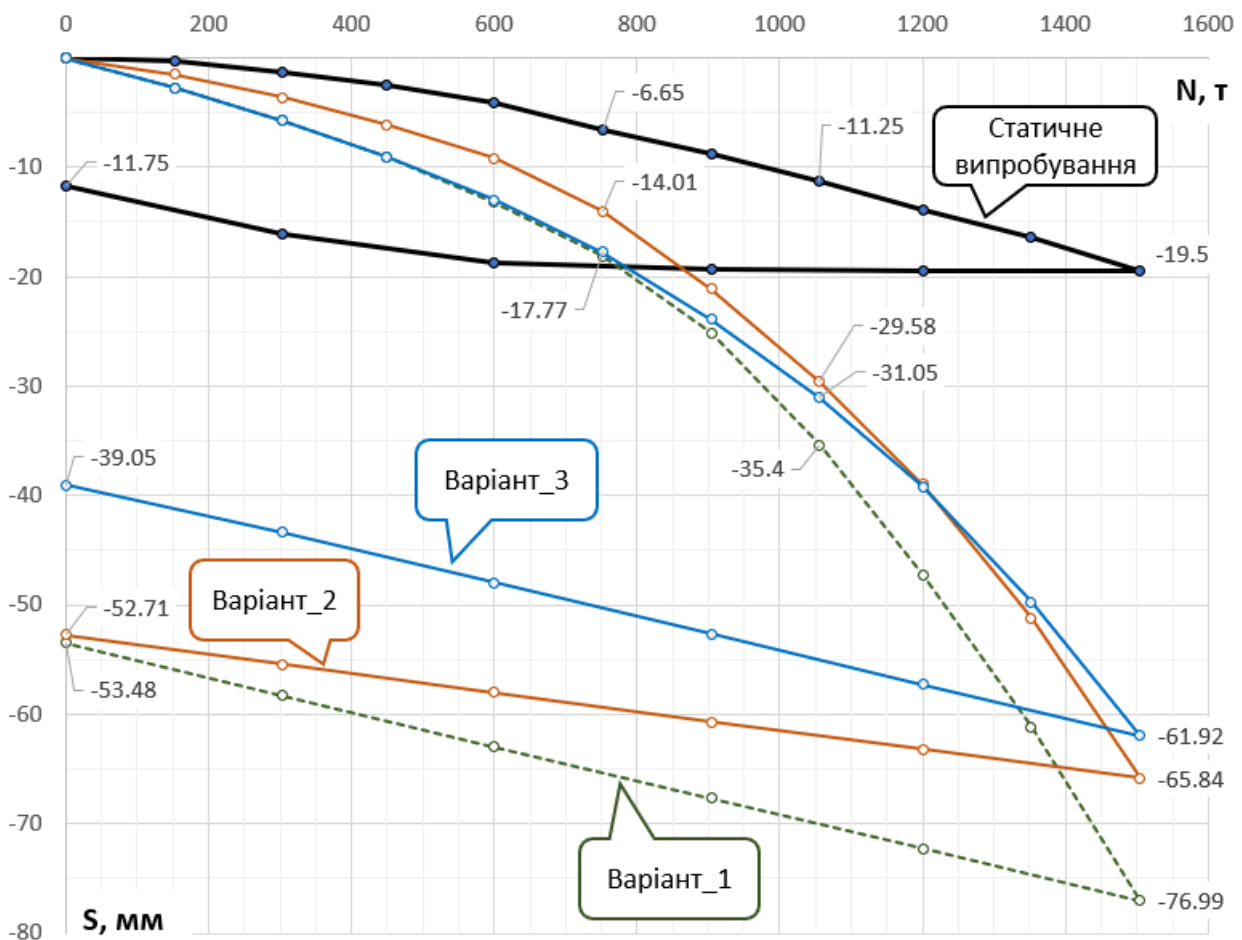


Рис.3. Співставлення графіків натурного випробування бурової палі та числового моделювання з розрахунковими параметрами ґрунтів при початковій ідентифікації. Відображення впливу модуля розвантаження та кута дилатансії.

Fig.3. Comparison of the graphs of the full-scale test of the bored pile and numerical modeling with the calculated soil parameters at the initial identification. Displaying the effect of the unloading module and dilatancy angle.

Варіант 2 підбору параметрів (див. табл. 2) відображає вплив модуля деформації при розвантаженні  $E_{ur}^{ref}$  на графік осідання від навантаження. За даним варіантом було прийнято що  $E_{ur}^{ref} = 8 \cdot E$ , бо при більших значеннях відбувалось руйнування ґрунту.

Видно з рис.3 що даний параметр зменшує осідання не тільки по кривій розвантаження, а і по кривій завантаження. По кривій завантаження осідання зменшилось на 15%, а по кривій розвантаження спочатку також 15% але при повному знятті навантаження тільки

на 2%. Загальне підняття палі від повного завантаження до повного розвантаження становить 13,13мм, що на 45% менше за вар.1 – це свідчить про те що крива розвантаження починає наблизитись до горизонталі.

Варіант 3 підбору параметрів (див. табл. 2) демонструє вплив кута дилатансії ( $\psi$ ) на криву осідання при моделюванні. З попередньої статті [5] було встановлено, що до ступені навантаження 752т графік має лінійну залежність, а після починає формуватися смуга локалізації зсувних напружень. Кут дилатансії був прийнятий рівним  $\psi = 11^0$  (за досвідом цей кут в межах 1/3 - 1/2 від кута внутрішнього тертя ( $\phi$ )). З огляду вар. 3 (рис. 3) видно, що кут дилатансії зменшує осідання починаючи з ділянки графіка де зникає пряма пропорційність між навантаженням і осіданням. Осідання при повному завантаженні у порівнянні з вар. 1 зменшилось на 20%, а от кут нахилу кривої розвантаження майже не змінився.

В даній роботі такі параметри як питоме зчеплення ( $c$ ) та кут внутрішнього тертя ( $\phi$ ) не змінювались і лишились такими якими їх надали інженери-геологи. Ці параметри ( $c$ ,  $\phi$ ) зазвичай зменшують з метою збільшення значень осідання при відповідних ступенях навантаження, а в нашому випадку значення осідання необхідно було зменшувати і це можна досягти тільки використовуючи кут дилатансії піску ( $\psi$ ).

Показник ступеня залежності жорсткості від рівня навантаження ( $m$ ) для кожного із шарів ґрунтів при ідентифікації параметрів також залишився без змін.

Всього було проведено більше сотні постановок задачі взаємодії бурової палі з ґрунтовим масивом для наближення результатів числового моделювання до натурального випробування. Після чого шляхом аналізу отриманих результатів було відібрано три найбільш вдалі збіжності результатів моделювання та натурального випробування. Ці дані наведені нижче у таблиці 3.

Тепер проаналізуємо на коректність величину тих параметрів що задані у варіантах 4, 5 та 6. Примітка: у всіх цих варіантах крива навантаження після ступені 752т має

збіжність 5% з натурним випробуванням, а от крива розвантаження має суттєві відхилення.

Табл. 3. Варіанти ідентифікованих параметрів для моделі ґрунту Hardening Soil Model.  
Table 3. Variants of identified parameters for the Hardening Soil Model.

| Варіант_4             | Коеф. | ІГЕ |     |      |      |
|-----------------------|-------|-----|-----|------|------|
|                       |       | 1   | 2а  | 16   | 19   |
| $E_{50}^{ref}$ , Мпа  | 3     | 15  | 33  | 171  | 87   |
| $E_{oed}^{ref}$ , Мпа | 3     | 15  | 33  | 171  | 87   |
| $E_{ur}^{ref}$ , Мпа  | 20    | 100 | 220 | 1140 | 580  |
| $c$ , кПа             | 1     | 7   | 16  | 1    | 59   |
| $\phi$ , град.        | 1     | 22  | 24  | 32   | 27   |
| $\psi$ , град.        | 26    | -   | -   | 26   | -    |
| Варіант_5             | Коеф. | ІГЕ |     |      |      |
|                       |       | 1   | 2а  | 16   | 19   |
| $E_{50}^{ref}$ , Мпа  | 4     | 20  | 44  | 228  | 116  |
| $E_{oed}^{ref}$ , Мпа | 4     | 20  | 44  | 228  | 116  |
| $E_{ur}^{ref}$ , Мпа  | 40    | 200 | 440 | 2280 | 1160 |
| $c$ , кПа             | 1     | 7   | 16  | 1    | 59   |
| $\phi$ , град.        | 1     | 22  | 24  | 32   | 27   |
| $\psi$ , град.        | 11    | -   | -   | 11   | -    |
| Варіант_6             | Коеф. | ІГЕ |     |      |      |
|                       |       | 1   | 2а  | 16   | 19   |
| $E_{50}^{ref}$ , Мпа  | 4     | 20  | 44  | 228  | 116  |
| $E_{oed}^{ref}$ , Мпа | 4     | 20  | 44  | 228  | 116  |
| $E_{ur}^{ref}$ , Мпа  | 20    | 100 | 220 | 1140 | 580  |
| $c$ , кПа             | 1     | 7   | 16  | 1    | 59   |
| $\phi$ , град.        | 1     | 22  | 24  | 32   | 27   |
| $\psi$ , град.        | 15    | -   | -   | 15   | -    |

Для початку розглянемо варіант моделювання 4 (дивись табл. 3). Для ідентифікації було прийнято, що модулі  $E_{50}^{ref} = E_{oed}^{ref} = 3 \cdot E$ , а модуль розвантаження  $E_{ur}^{ref} = 20 \cdot E$ . Це значить що  $E_{ur}^{ref} / E_{50}^{ref} = 6,67$  що є завищеним бо за досвідом це співвідношення знаходиться в межах 2-5 разів. Кут дилатансії  $\psi=26^0$ , а це також забагато бо це значення повинно знаходитись в межах 1/3–1/2 від кута внутрішнього тертя ( $\phi$ ), тобто  $\psi = 11^0 \dots 16^0$ . Максимальне осідання становить 19,53мм. Загальне підняття палі від повного завантаження до повного розвантаження становить 10,77мм. Остаточне осідання палі після зняття навантаження 8,76мм.

Тепер розглянемо варіант моделювання 5 (дивись табл. 3). Для ідентифікації було прийнято, що модулі  $E_{50}^{ref} = E_{oed}^{ref} = 4 \cdot E$ , а модуль розвантаження  $E_{ur}^{ref} = 40 \cdot E$ . Це значить що  $E_{ur}^{ref} / E_{50}^{ref} = 10$ , що є доволі завищеним значенням, а от кут дилатансії  $\psi=11^{\circ}$  знаходиться у вище вказаному діапазоні. Максимальне осідання становить 20,74мм. Загальне підняття палі від повного завантаження до повного розвантаження становить 10,07мм. Остаточне осідання палі після зняття навантаження 10,67мм.

Варіант моделювання 6 (дивись табл. 3). Для ідентифікації було прийнято, що модулі  $E_{50}^{ref} = E_{oed}^{ref} = 4 \cdot E$ , а модуль розвантаження  $E_{ur}^{ref} = 20 \cdot E$ . Це значить що  $E_{ur}^{ref} / E_{50}^{ref} = 5$  що знаходиться в діапазоні 2...5,

і кут дилатансії  $\psi=15^{\circ}$ , що також знаходиться в межах  $11^{\circ} \dots 16^{\circ}$ . Максимальне осідання становить 19,62мм. Загальне підняття палі від повного завантаження до повного розвантаження становить 10,41мм. Остаточне осідання палі після зняття навантаження 9,21мм.

Таким чином у варіанті моделювання 6 (табл. 3) вказано остаточно прийняті ідентифіковані розрахункові параметри ґрунтів для відповідності результатів моделювання та статичного випробування палі на вертикальне вдавлююче навантаження ( $\gamma$ ,  $\nu$ ,  $\phi$ ,  $c$ ,  $m$  - без змін). Співставлення графіків натурального випробування бурової палі та числового моделювання з прийнятими розрахунковими параметрами ґрунтів із ідентифікацією представлено на Рис.4.

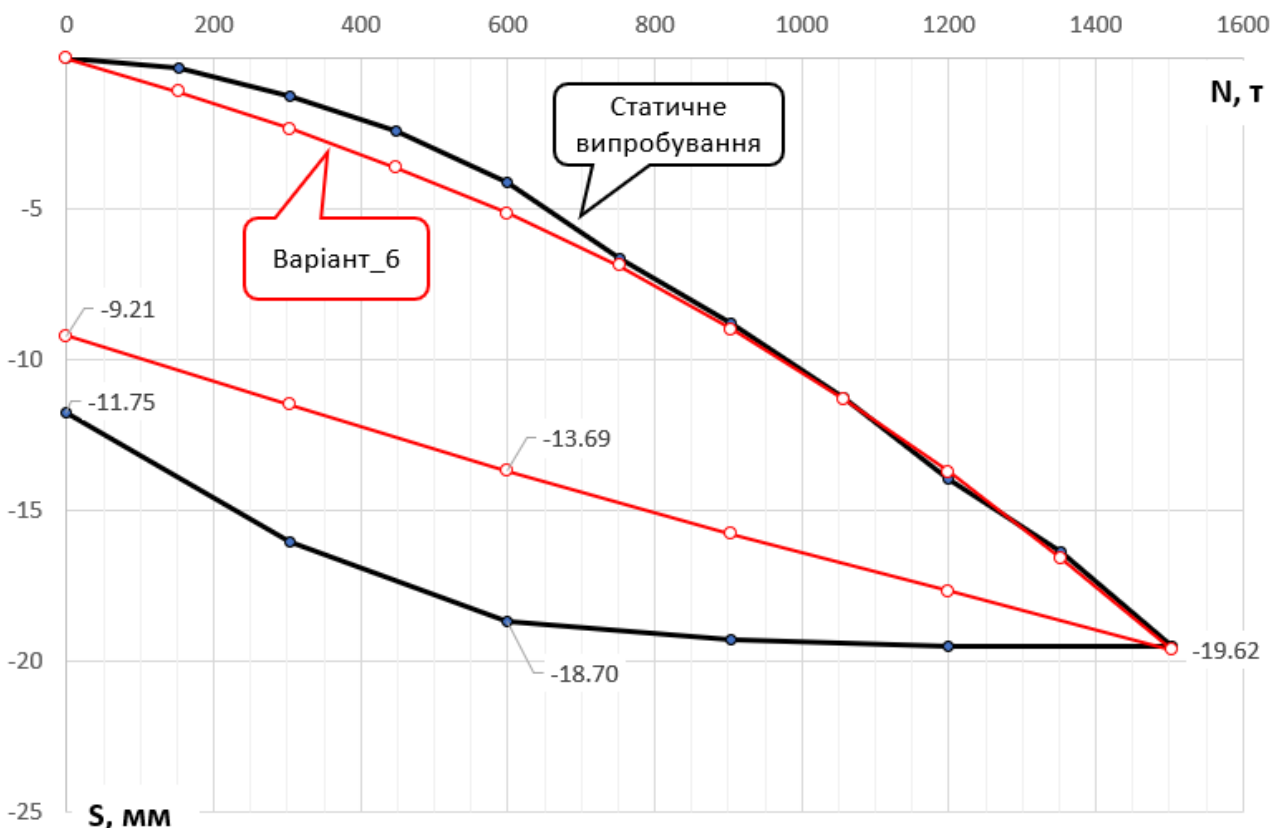


Рис.4. Співставлення графіків натурального випробування бурової палі та числового моделювання з прийнятими розрахунковими параметрами ґрунтів із ідентифікацією.

Fig.4. Comparison the graphs of full-scale test of a bored pile and numerical modeling with the accepted design parameters of soils with their identification.

Отже нами встановлено, що для збіжності в широкому діапазоні навантажень графіків польового випробування палей

статичним навантаженням та його відповідного числового моделювання в межах 5% (по кривій навантаження в зоні пластичних

деформацій) в даних ґрунтових необхідно прийняти, що  $E_{50}^{ref} = E_{oed}^{ref} = 4 \cdot E$  та  $E_{ur}^{ref} = 20 \cdot E$  і при цьому врахувати кут дилатансії піщаного ґрунту в межах до 1/2 від значення кута внутрішнього тертя ( $\varphi$ ).

## ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Встановлено, що моделювання одиначної бурової палі, на основі результатів її натурного випробування та звіту з інженерно-геологічних вишукувань, дозволяє ідентифікувати розрахункові параметри ґрунтів для подальших розрахунків конструкцій будівель та споруд.

Виявлено, що підстановка у модель ґрунту Hardening Soil Model прямих значень параметрів ґрунтів наданих у звіті з інженерно-геологічних вишукувань при числовому моделюванні взаємодії елементів системи «основа – бурова палля» та при наявності структурно-нестійких ґрунтів може призвести до значного збільшення осідання її в межах робочого діапазону навантажень до 3,5 разів, а при максимальному навантаженні до 4 разів у порівнянні із фактичним осіданням палі при випробуванні. Тому для збіжності результатів моделювання та натурного випробування необхідно проводити ідентифікацію розрахункових параметрів ґрунтів що оточують палю.

Виявлено, що у даних ґрунтових умовах врахування співвідношення модулів  $E_{50}^{ref} = E_{oed}^{ref} = 4 \cdot E$  у комбінації із модулем розвантаження  $E_{ur}^{ref} = 20 \cdot E$  (де  $E$  – це модуль із звіту з інженерно-геологічних вишукувань) призводить до задовільної кореляції даних числового моделювання та польового випробування в діапазоні навантажень до половини максимального навантаження на палю.

Встановлено, що на наступних етапах збільшення навантаження на бурову палю призводить до виникнення значних пластичних деформацій зсуву, а враховуючи що в даній роботі нижня частина палі знаходиться у піску то ведучим параметром є кут дилатансії ( $\psi$ ). Для кращої збіжності результатів кут дилатансії прийнятий рівним 1/2 від кута

внутрішнього тертя ( $\psi = 15^\circ$ ).

Показано, що вплив модуля  $E_{ur}^{ref}$  на графік розвантаження бурової палі суттєвого впливу не має. Помічено що збільшення модуля розвантаження ( $E_{ur}^{ref}$ ) зменшує осідання не тільки по кривій розвантаження палі, а і в межах кривої навантаження.

Виявлено, що врахування вище вказаних рекомендацій дає відхилення в межах 5% для графіків польового випробування паль статичним навантаженням та його відповідного числового моделювання в широкому діапазоні навантажень.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Schanz, T. Formulation and verification of the Hardening Soil model / T. Schanz, P.A. Vermeer, P.G. Bonnier // *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*. – Balkema, Rotterdam, 1999.
2. Бойко І.П. Методи випробувань ґрунтів за допомогою буроін'єкційної палі великого діаметру / І.П.Бойко, Ю.В.Карпенко, С.М.Новофастовський // *Основи і фундаменти: Міжвідомчий науково-технічний збірник*. – К.: КНУБА. – 2004. – Вип. 28. – с. 11-16.
3. Katzenbach R. Costoptimized foundation systems of high rise structures, based on the results of actual geotechnical research / R.Katzenbach, H.Hoffmann, M.Vogler, Ch.Moormann // *Proc. International Conference Trends in Tall Building – Tendenzen im Hochhausbau*, Frankfurt am Main, 5-7.9.2001, с. 421-443.
4. Зоценко Л.М. Особливості влаштування буроін'єкційних паль у водонасичених піщаних ґрунтах / Л.М. Зоценко, В.П. Левченко, С.В. Біда, М.Ф. Передерій // *Зб. наук. праць (Галузеве машинобудування, будівництво)*. – Полтава: ПНТУ, 2009. – 76с.
5. Бойко І.П. Числове моделювання взаємодії бурової палі з врахуванням дилатансії ґрунту / І.П.Бойко, О.А.Кривенко, О.В.Гаврилюк // *Науково-технічний збірник «Основи та фундаменти»*. – К.: КНУБА. – 2023. – Вип. 46. – С.9-16. DOI:10.32347/0475-1132.46.2023.9-16.

## REFERENCES

1. Schanz, T., Vermeer, P.A., Bonnier, P.G. (1999). Formulation and verification of the Hardening



- Soil model. *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*. Balkema, Rotterdam.
2. Boyko I.P., Karpenko Yu.V., Novofastovskyi S.M. (2004) Metody vyprobuvan gruntiv za dopomohoiu buroiniektsiinoi pali velykoho diametru [Methods of soil tests using large-diameter continuous flight auger piles] Osnovy i fundamente: *Mizhvidomchyi naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*. Kyiv: KNUBA, 28, 11-16 (in Ukrainian).
  3. Katzenbach R., Hoffmann H., Vogler M., Moormann Ch. (2001). Costoptimized foundation systems of high rise structures, based on the results of actual geotechnical research. *Proc. International Conference Trends in Tall Building – Tendenzen im Hochhausbau*. Frankfurt am Main, 5-7.9.2001, c. 421-443.
  4. Zotsenko, L.M., Levchenko, V.P. Bida, S.V., Perederii, M.F. (2009). Osoblivosti vlash-tuvannya buroiniektsiynih pal u vodonasichenih pischanih gruntah [Features of the installation continuous flight auger piles in water-saturated sandy soils]. *Zb. nauk. prats (Galuzeve mashinobuduvannya, budivnitstvo)*. Poltava: PNTU, 76 (in Ukrainian).
  5. Boyko, I.P., Krivenko, O.A., Gavryliuk, O.V. (2023). Chyslove modeliuvannya vzaiemodii burovoi pali z vrakhuvanniam dylatansii gruntu [Numerical simulation of interaction bored pile and soil mass with taking into account the dilatancy of the soil]. *Osnovu ta fundamente: Naukovo-tekhnichnyj zbirnyk*. Kyiv: KNUBA, 46, 9-16. DOI:10.32347/0475-1132.46.2023.9-16. (in Ukrainian).

#### Features of interaction bored pile with the soil base in the presence of structurally unstable soils

Igor Boyko,  
Viktor Nosenko,  
Oleg Krivenko

**Summary.** During the construction of pile foundations, the pile testing process is necessary and mandatory. Therefore, there is a need for a correct assessment of the interaction elements of the "foundation-pile" system with the provision of a reliable and effective design solution.

If the soil parameters provided in the reports on engineering and geological searching are used without their prior refinement, this leads to a significant discrepancy in the results of numerical modeling of

the interaction of piles with the base and data from field tests. In this regard, there is a need to identify the design parameters of the adopted soil model in order to match the modeling results with the results of experimental studies in a wide range of loads.

The Hardening Soil Model was chosen to describe the interaction behavior of the elements of base-pile system in this study. The nature of the influence of the three modules identified in the above model was investigated: modulus deformation at 50% of the base strength ( $E_{50}^{ref}$ ); compressive strain module ( $E_{oed}^{ref}$ ); strain module at unloading ( $E_{ur}^{ref}$ ). The influence of the effect of dilatancy of the sand base was also analyzed.

At the initial stage of loading, the values of the  $E_{50}^{ref}$  and  $E_{oed}^{ref}$  modules make a significant contribution to its performance. With further increased loads in the soil, significant plastic shear deformations occur, and accordingly, the parameters of soil strength ( $c$ ,  $\varphi$ ) are the leading parameters. Due to the fact that the upper part of the bored pile is located in structurally unstable soils (bulk soil and plastic sandy loam), and the lower part of the pile is located within sandy soil for a significant part of its length, it is also important to take into account the effect of soil dilatancy ( $\psi$ ).

It was found that an increase in the unloading module ( $E_{ur}^{ref}$ ) reduces not only the settlement along the unloading curve, but also along the load curve.

The results of comparison of full-scale testing of a bored pile and its numerical modeling of interaction with structurally unstable and sandy soils are presented, and the design parameters of the soil environment model are identified in order to match the modeling results with experimental data at the corresponding specified loads.

The obtained convergence is within 5% in a wide range along the curve of the load on the bored pile.

**Key words.** Bored pile, pile test, identification of parameters, numerical modeling, unloading module, dilatancy angle.