

Числове моделювання взаємодії бурюін'єкційної палі з ґрунтовим масивом при дії статичного вертикального навантаження

Ігор Бойко¹, Олег Кривенко²

Київський національний університет будівництва і архітектури
31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037,
¹boyko40@ukr.net, orcid.org/0000-0002-6841-0271,
²krivenko.olegus@gmail.com, orcid.org/0000-0002-1999-2770

DOI: 10.32347/0475-1132.43.2021.9-16

Анотація. Відтворено натурне статичне випробування бурюін'єкційної палі на вертикальне навантаження за допомогою числового моделювання.

Процес моделювання можна розбити на два етапи: визначення розрахункових меж ґрунтового масиву; ідентифікація механічних параметрів ґрунтів (кута внутрішнього тертя, питомого зчеплення, модуля деформації). Перший етап моделювання полягає у тому, щоб розбити у плані сітку на скінченні елементи таким чином, щоб вона згущалась від периферії і до самої бурюін'єкційної палі (в нашому випадку крок сітки змінюється від 1м і до 10см). Потім розбити на скінченні елементи масив по висоті з певним кроком (в даній роботі крок 1м). Після чого треба визначити скільки по висоті ґрунту буде під вістрям палі. Для цього розглянуто 4 варіанти: 2,5м; 5м; 10м; 20м. Дивлячись на результати, видно, що починаючи з 10м і менше, відхилення в межах 5%, то за основу приймаємо потужність ґрунту рівною 10м. Потім підбирався розмір ґрунтового масиву у плані. Було розглянуто 5 варіантів: 5х5м; 10х10м; 20х20м; 30х30м; 40х40м. За основу було прийнято 30х30м. Як результат даного етапу приймаємо під палею 10м, в плані 30х30м (палея розміщена по центру).

Після встановлення розмірів розрахункової моделі переходимо до ідентифікації механічних характеристик ґрунту (E, c, φ). Ідентифікація механічних характеристик ґрунту проводилась в прошарку навколо палі товщиною 10см. Спочатку за лінійним розрахунком проводилась ідентифікація модуля деформації (E). Встановлено, що при модулі деформації рівним 4E дозволяє найбільш точніше відтворити результати



Ігор Бойко
завідувач кафедри
геотехніки
д.т.н., проф.



Кривенко Олег
асистент кафедри
геотехніки

польових випробувань в межах пружної роботи ґрунту. Якщо при цьому ще врахувати нелінійність то наш графік починає загинатись. Потім була проведена ідентифікація питомого зчеплення(c), яка показала що цей показник не вносить істотного внеску в залежність між навантаженням та осіданням. Тому прийнято питоме зчеплення залишити без змін. Кут внутрішнього тертя враховано з коефіцієнтом 0,75.

Спираючись на встановленні розміри ґрунтового масиву та ідентифіковані механічні параметри ґрунтів, було проведено порівняння результатів розрахунків за трьома умовами міцності: Губера-Мізеса, Друккера-Прагера, Кулона-Мора.

Ключові слова. Бурюін'єкційна палея, питоме зчеплення, кут внутрішнього тертя, модуль деформації, бурова палея, буронабивна палея, умова міцності.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

З огляду на те, що останнім часом широкого розповсюдження у будівництві набули висотні будинки, то найбільш розповсюдженими стали пальові чи пальово-плитні фундаменти з бурових паль (буроін'єкційні, буронабивні), так як вони здатні сприймати великі навантаження. Серед паль в свою чергу широко застосовують буроін'єкційні палі (БІП).

Перед тим як прийняти остаточне рішення інженеру-проектувальнику стосовно варіанту фундаменту для будівельного майданчика, йому необхідно надати результати з натурального статичного випробування паль (будь-то вертикальне навантаження на палю чи горизонтальне у випадку підпірних стін). Ці результати зводяться у кінці до двох графіків: перший графік – це залежність переміщення палі від поступово прикладеного навантаження (ступенями) на неї $S=f(N)$; другий графік - це залежність переміщення палі від поступово зняття навантаження (ступенями) з неї $S=f(N)$. Тобто іншими словами графік навантаження та розвантаження. Якщо подивитись, наприклад, на характер лінії навантаження, то видно, що спочатку йде пропорційна залежність осідання від навантаження, а потім криволінійна (при однакових ступенях навантаження - осідання починає зростати). Тобто законом Гука описати графік навантаження палі, наприклад, статичним вертикальним, коректно не вийде.

І, як результат, при розрахунку будівлі у програмному числовому комплексі, розглядаючи роботу системи «основа-фундамент-надземні конструкції», необхідно, опираючись на натурні випробування палі, відтворити їх роботу при моделюванні. Вище вказане дозволить отримати сідання фундаментів, які будуть близькими до реальності, що в свою чергу відтворить реальну картину перерозподілу зусиль у несучих конструкціях (фундаментна плита, а при моноліті ще і стіни підвалу, стіни та плити перекриття перших поверхів). Тобто, отримавши в такому випадку напружено-деформований стан (НДС), який буде від-

повідати дійсності, дозволить нам забезпечити надійні проектні рішення як для фундаментів так і для конструктиву будівлі в цілому.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Питаннями дослідження роботи буроін'єкційних паль з ґрунтовим масивом займалися Бойко І.П. [2, 3], Зоценко М.Л., Левченко В.П. [4, 5, 6] та інші вчені.

МЕТА РОБОТИ

Відтворити натурне статичне випробування буроін'єкційної палі на вертикальне навантаження за допомогою числового моделювання.

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Експериментальний майданчик представлений наступними ґрунтами (згори до низу): пісками, супісками, глинами та суглинками.

Для моделювання роботи буроін'єкційної палі у ґрунті була прийнята трьох-вимірна постановка. Масив ґрунту, що оточує палю, має форму призми (рис.1). Призма складається з 6-ти та 8-ми куткових універсальних ізопараметричних скінченних елементів. В середині цієї призми розташована буроін'єкційна палія діаметром 0,62м (БІП-620) і довжиною 21,м.

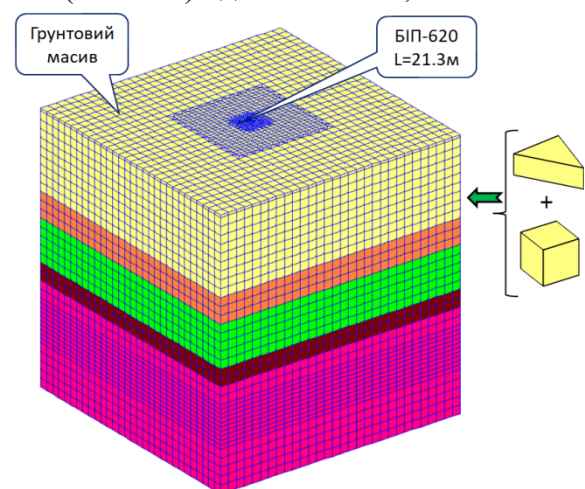


Рис.1. Розрахункова модель
Fig.1. Calculation model

У горизонтальній площині модель ґрунту розбита на СЕ з розміром сторін у діапазоні від 1м (периферійна зона) і до 0.1м. Прошарок ґрунту товщиною 0.1м навколо буроін'єкційної палі, був створений для того, щоб у подальшому у ньому ідентифікувати механічні параметри ґрунтів (рис.2). Далі у статті будуть визначатись оптимальні габарити масиву ґрунту у плані.

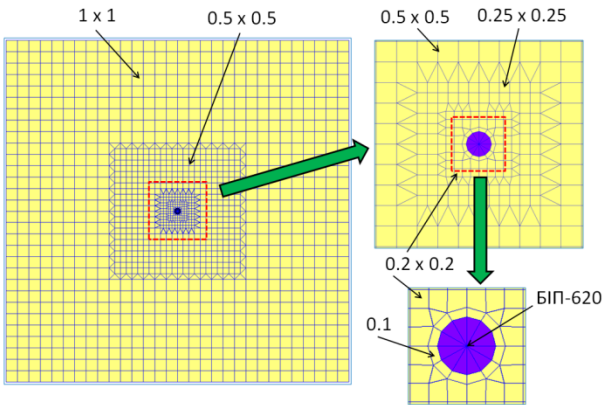


Рис.2. Горизонтальне розбиття масиву ґрунту на СЕ

Fig.2. Horizontal division of the soil mass into FE

У горизонтальній площині модель ґрунту по довжині палі розбита на СЕ висотою по 1м (лише там де оголовок 0,3м – це через той факт, що довжина палі не кратна метру, а складає 21,3м), під п'ятою зразу по 0,5м, а ще нижче по 1м (рис.3). У статті далі буде визначатись оптимальна потужність ґрунту під п'ятою палі.

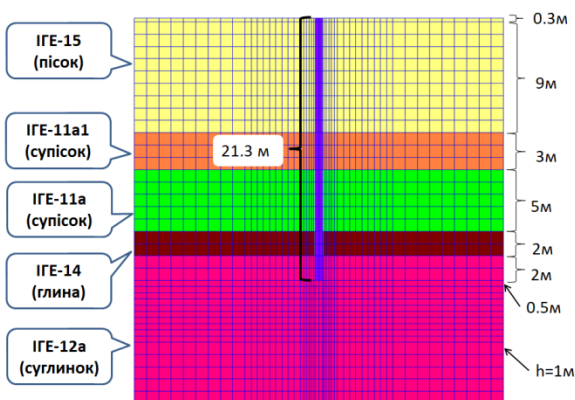


Рис.3. Вертикальне розбиття масиву ґрунту на СЕ

Fig.3. Vertical division of the soil mass into FE

Механічні показники характеристик ґрунтів експериментального майданчика наведені у таблиці 1.

Табл. 1. Показники механічних властивостей ґрунтів

Table 1. Indicators mechanical properties of the soils

№ ІГЕ	Модуль Пуассона	Кут внутрішнього тертя, градуси	Питоме зчеплення, т/м ²	Модуль деформації, т/м ²
	ν	ϕ	c	E
15	0.3	33	0.3	3000
11a1	0.35	24	1.3	1900
11a	0.35	21	1.1	1500
14	0.42	19	4.8	1800
12a	0.42	19	3.4	2000

Перед тим як визначати розміри ґрунтового масиву та в подальшому механічні характеристики ґрунтів – встановимо як саме будемо моделювати саму палю: стержнем чи об'ємним елементом? Якщо подивитись на рис. 4, то побачимо що графік осідання від навантаження для палі, що задана об'ємними елементами, ближче розташований до графіка натурального випробування палі. Це можна пояснити тим, що паля при задані об'ємними елементами має більш вузлів стикування з ґрунтовим масивом (на відміну від стержня) і тому осідання стає меншим і більш наближеним до натурального випробування. Тому, з огляду на вище сказане, в подальших розрахунках паля буде задана об'ємними елементами.

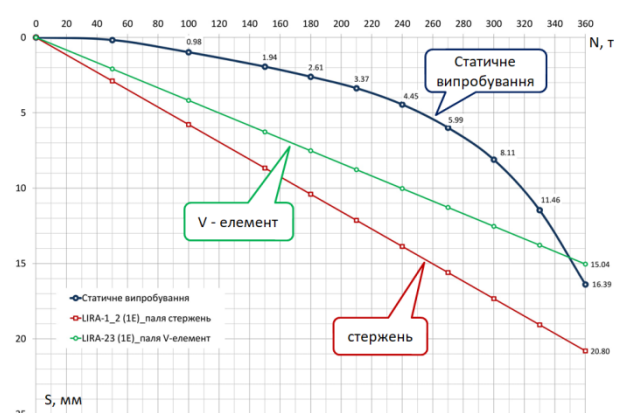


Рис.4. Вибір задання тіла палі (стержень, об'ємний елемент)

Fig.4. The body selection of pile(rod, three-dimensional element)

Тепер перейдемо до розмірів ґрунтового масиву, який представлений паралелепіпедом. Для коректного розрахунку необхідно встановити такі мінімальні розміри масиву ґрунту (потужність ґрунту під палею та розмір у плані), які не будуть в подальшому впливати на розрахунок.

Спочатку підберемо висоту ґрунтового масиву під п'ятою палі. Для цього змодельюємо 4 варіанти: 2,5м; 5м; 10м; 20м. Дивлячись на графіки (рис.5), бачимо, що починаючи з 10м і менше, відхилення в межах 5%, то за основу приймаємо потужність ґрунту рівною 10м.

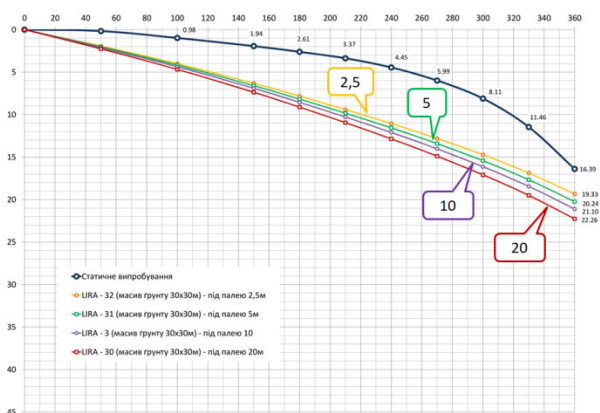


Рис.5. Потужність ґрунтового масиву під п'ятою палі, м
Fig.5. The thickness of the soil mass under the pile tip, m

Потім підбирався розмір ґрунтового масиву у плані. Було розглянуто 5 варіантів (дивись рис.6): 5x5м; 10x10м; 20x20м; 30x30м; 40x40м. За основу було прийнято 30x30м.

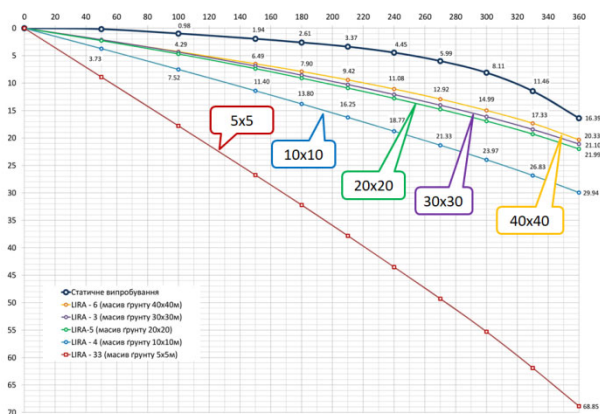


Рис.6. Розмір ґрунтового масиву в плані, м
Fig.6. The size of the soil mass in the plan, m

З огляду на рис.4, 5, 6 приймаємо остаточно для подальших розрахунків наступну геометрію моделі: під палею 10м, в плані 30x30м (посередині паля із об'ємних елементів).

Після встановлення розмірів розрахункової моделі переходимо до ідентифікації механічних характеристик ґрунту (E, c, φ). Ідентифікація механічних характеристик ґрунту проводилась в прошарку навколо палі товщиною 10см (рис.7).

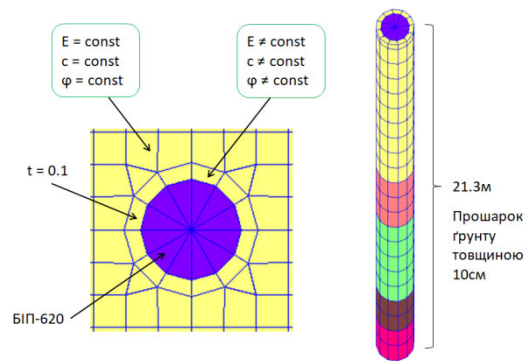


Рис.7. Прошарок ґрунту товщиною 10см навколо палі
Fig.7. A layer of soil around a pile with thickness 10 cm

Спочатку за лінійним розрахунком проводилась ідентифікація модуля деформації (E). Було розглянуто 4 варіанти (модуль одночасно у всіх ґрунтах збільшувався кратно відповідно до початкового свого значення): при модулі деформації з інженерно геологічних вишукувань E (без змін модуля); при 2E; при 4E; при 8E. Розрахунки виконувались у лінійній постановці. Третій розрахунок (модуль 4E) виявився таким, що найбільше співпадає з результатами польових випробувань в межах пружної роботи ґрунту. Штриховою лінією відображено нелінійний розрахунок при модулі деформації «4E». Як ми бачимо графік почав потроху загинатись відтворюючи характер графіку натурного випробування (рис.8).

Потім за основу для ідентифікації питомого зчеплення (c) було взято нелінійний розрахунок при «4E». Було порівняно 3 варіанти розрахунків: c; 0,5c; 0,1c (рис.9).

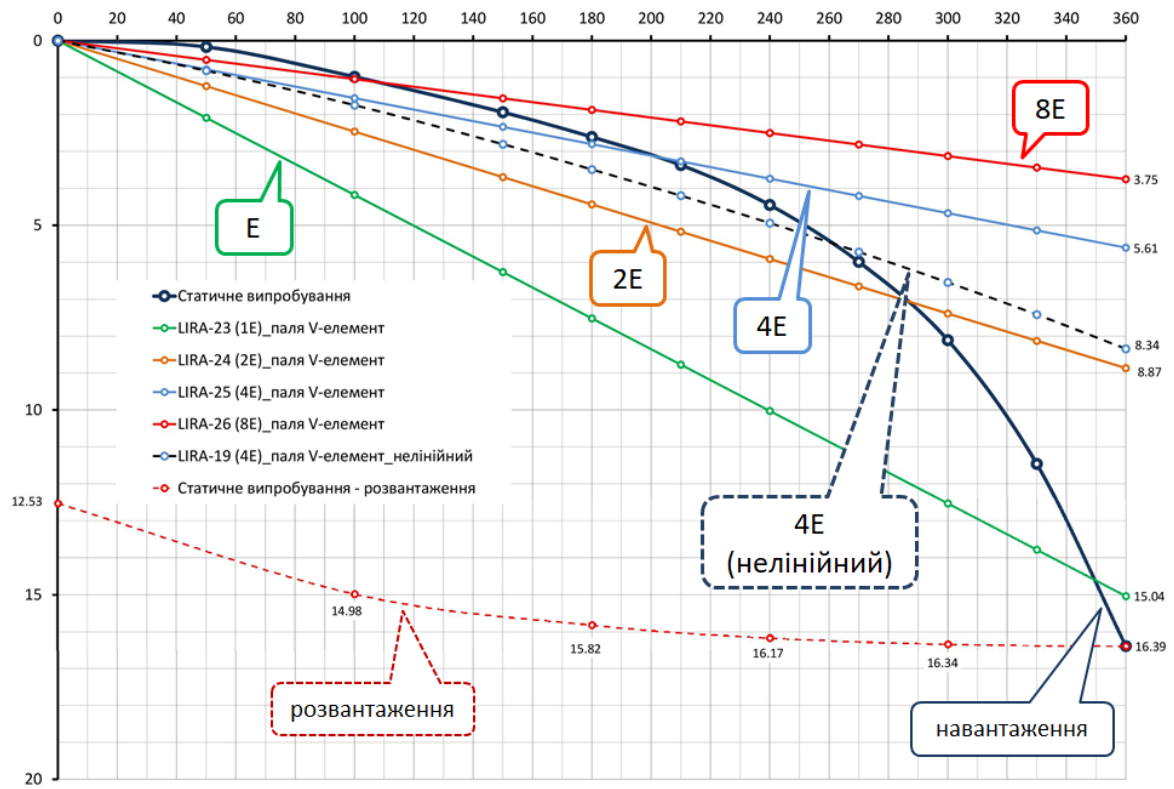


Рис.8. Ідентифікація модуля деформації (E)
Fig.8. Identification of young's modulus (E)

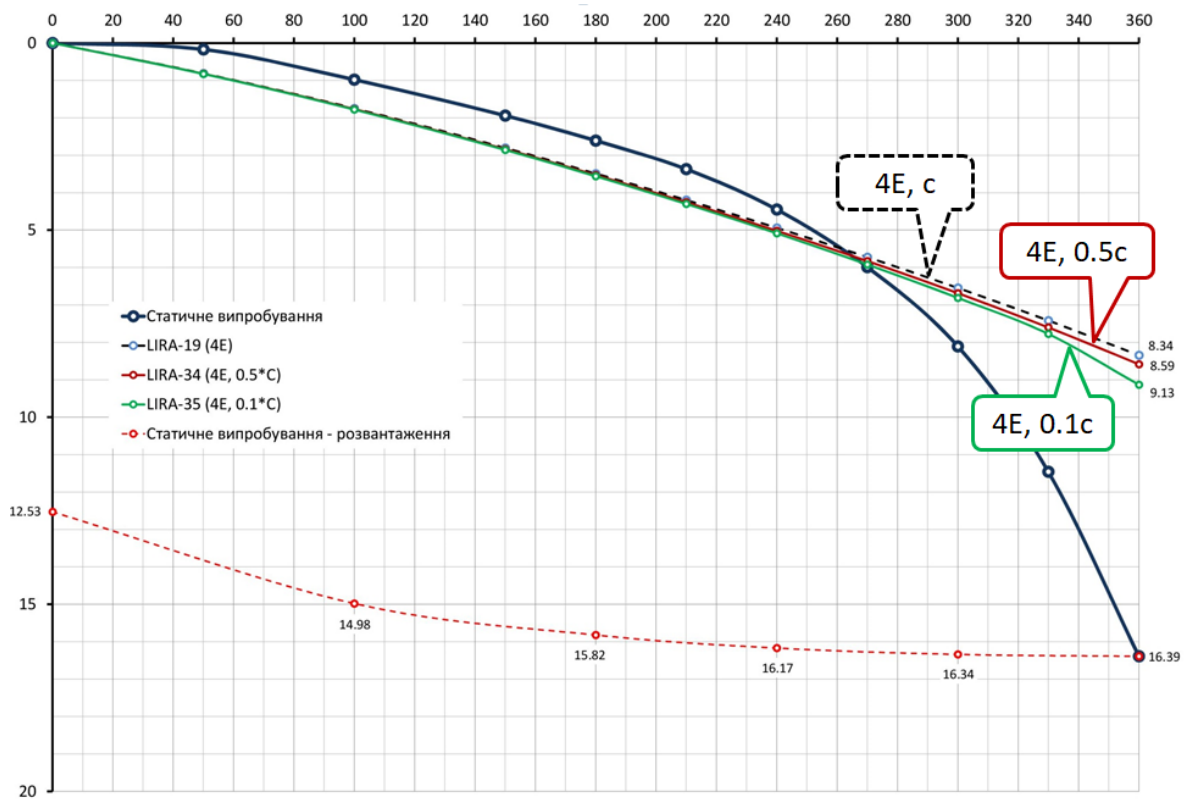


Рис.9. Ідентифікація питомого зчеплення (c)
Fig.9. Identification of cohesion (c)

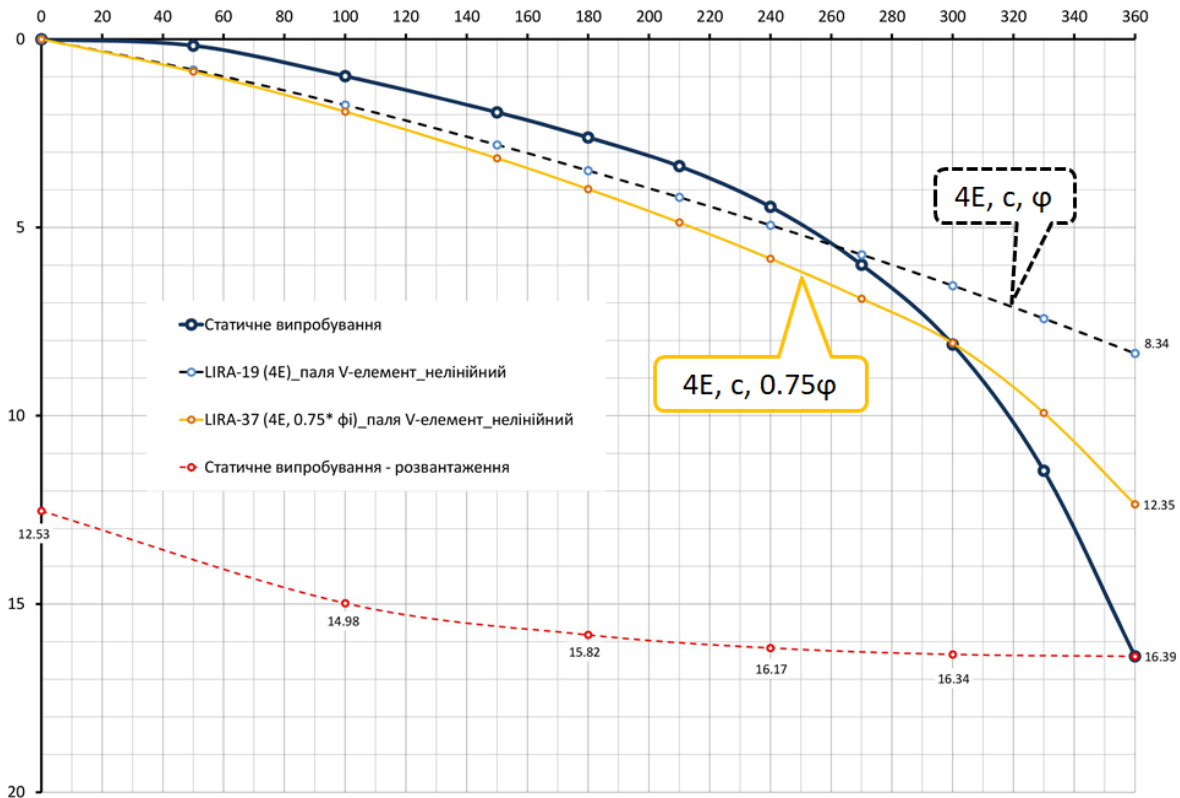


Рис.10. Ідентифікація кута внутрішнього тертя (ϕ)
 Fig.10. Identification of friction angle (ϕ)

Як видно з рис.9 зміна питомого зчеплення (c) не вносить істотного внеску в залежність між навантаженням та осіданням. Тому прийнято для подальших розрахунків питоме зчеплення залишити без змін ($c = \text{const}$).

Наступним та останнім параметром для ідентифікації механічних параметрів ґрунтів є кут внутрішнього тертя (ϕ). За основу було взято нелінійний розрахунок при «4E» та « c – без змін». Було порівняно 2 варіанти: ϕ (без змін); $0,75 \phi$. З огляду на форму графіків було прийнято останній варіант бо він найбільше відповідає характеру графіку натурного випробування (рис.10).

Треба наголосити на тому, що у вище вказаних нелінійних розрахунках використовувалася умова міцності Губера-Мізеса.

Було проведено додатково ще порівняння результатів розрахунків за різною умов міцності:

- умова міцності Губера-Мізеса;
- умова міцності Друккера-Прагера;
- умова міцності Кулона-Мора.

Результати порівняння різних умов міцності наведені на рис.11: видно що умова міцності Губера-Мізеса, дозволяє найбільш точно відтворити залежність $S=f(N)$, де S – це осідання, а N – навантаження.

Отже, можна сказати що для відтворення натурного випробування бурин'єкційної палі (БП-620) необхідно наступне:

- а) прийняти розмір ґрунтового масиву 30x30м в плані та 10м під подошвою;
- б) ідентифікувати механічні параметри ґрунтів, в нашому випадку: 4E, c , $0,75\phi$;
- в) умова міцності “Губера-Мізеса”.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Показано, що при підборі габаритів ґрунтового масиву значний вплив на результати моделювання дає розмір його в плані. Так, наприклад, результати розрахунку при розмірах ґрунтового масиву у плані 5x5м відрізняються від масиву 30x30м більше ніж в три рази (при однакових параметрах задач).

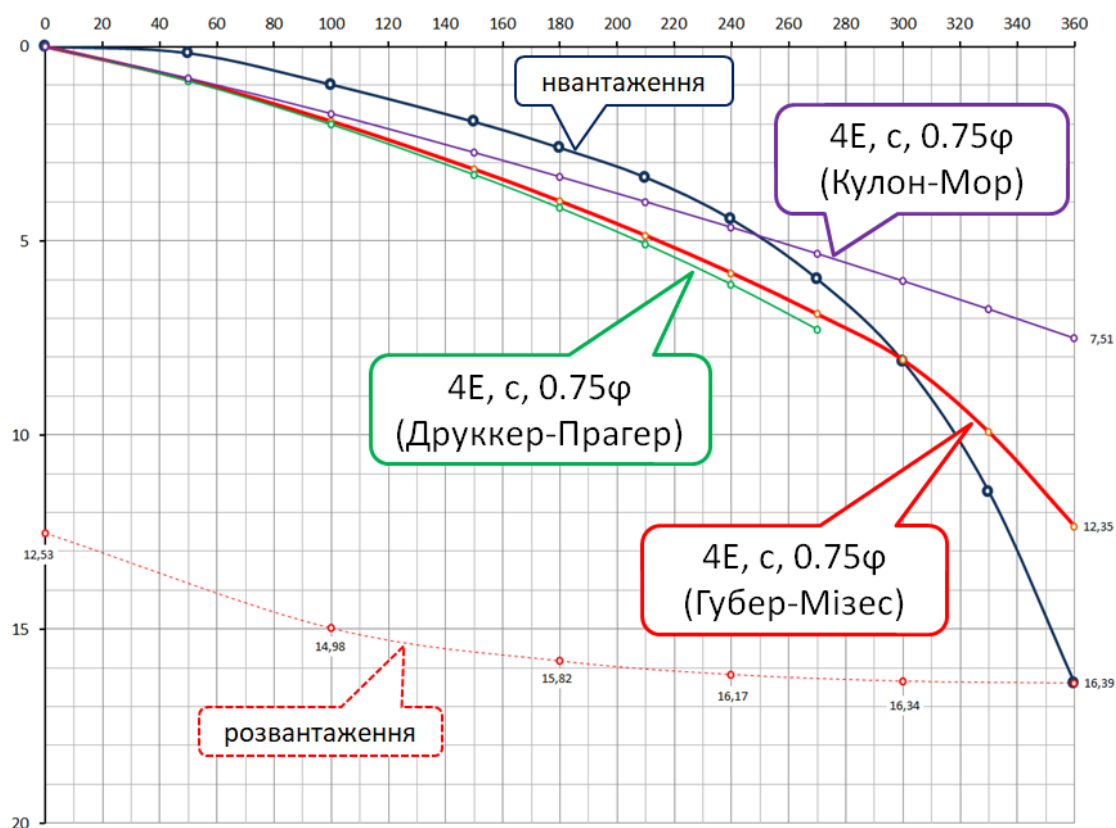


Рис.11. Порівняння трьох умов міцності (Губера-Місеса, Друккер-Прагер, Кулон-Мор)
 Fig.11. Comparison of the three conditions strength (Huber-Mises, Drucker-Prager, Mohr-Coulomb)

Встановлено що збільшення модуля деформації (E) в 4 рази дозволяє наблизити результати моделювання до натурних випробувань паль в межах $0,7N$ граничних значень навантажень на палю.

При розв'язанні нелінійних задач для отримання збіжності результатів між моделюванням та натурним випробуванням більш впливовим параметром був кут внутрішнього тертя (φ) ніж питоме зчеплення (c).

ЛІТЕРАТУРА

1. Основи та фундаменти споруд. Зміна № 1: ДБН В.2.1-10-2009. – [Чинний від 2011-07-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 55с.
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. – Вип. 28 – К.: КНУБА, 2004. – с. 11-16.
3. Бойко І.П. Сопротивление просадочных ґрунтов для расчета буроинъекционных свай / И.П. Бойко, А.Е. Дельник, А.Л. Козак, Н.И. Орленко // Республиканский межведомственный научно-технический сборник «Основания и фундаменты». Выпуск 223. – К.: Будівельник, 1990, с. 5-9.
4. Зоценко Л.М. Досвід використання буроін'єкційних паль в водонасичених лесових ґрунтах / Л.М. Зоценко, В.П. Левченко, В.М. Зоценко // Строительная наука и техника – Вып. № 3(18) – Минск, 2008. – С.23.
5. 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.
6. Левченко В.П. Експериментальні дослідження впливу обтиснення бетону при влаштуванні буроін'єкційних паль / В.П. Левченко // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. Трудов. – Вып. №74 – Дніпропетровськ ПГАСА, 2010. – С. 243-251.

REFERENCES

1. Osnovy ta fundamenty sporud. Zmina 1: DBN V.2.1–10–2009. (2011). Kyiv: Minregionbud Ukrainy, 55 (in Ukrainian).
2. Boyko I.P., Karpenko Yu.V., Novofastovskyi S.M. (2004). Metody vyprobuvan gruntiv za dopomohoiu buroinektsiinoi pali velykoho diametru [Methods of soil tests using large-diameter continuous flight auger piles] Osnovy i fundamenty: Mizhvidomchyi naukovotekhnichniy zbirnyk. Kyiv: KNUBA, 28, 11-16 (in Ukrainian).
3. Boyko I.P., Delnik A.E., Kozak A.L., Orlenko N.I. (1990). Soprotivlenie prosadochnyih gruntov dlya rascheta buroynektсионnyih svay [Resistance of collapsible soils to calculate continuous flight auger piles]. Respublikanskiy mezhve-domstvennyiy nauchno-tehnicheskiy sbornik «Osnovaniya i fundamenty». Kyiv: Budivelnik, 223, 5-9 (in Russian).
4. Zotsenko L.M., V.P. Levchekno. (2008). Dosvid vikoristannya buroinektsiynih pal v vodonasichenih lesovih gruntah [Experience of using continuous flight auger piles in saturated loessial soils] Stroitel'naya nauka i tehnika. Minsk, 3(18), 23 (in Ukrainian).
5. Zotsenko L.M., V.P. Levchenko, S.V. (2009). Osoblivosti vlashtuvannya buroinektsiynih 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).
6. Levchenko V.P. (2010). Eksperimentalni doslidzhennya vplivu obtisnennya betonu pri vlashtuvanni buroinektsiynih pal [Experimental investigations of the influence of concrete compression on the arrangement of continuous flight auger piles]. Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie: Sb. nauch. Trudov. Dni propetrovsk PGASA, 74, 243-251 (in Ukrainian).

Numerical simulation of interaction continuous flight auger pile with a soil mass under static vertical load

*Igor Boyko,
Oleg Krivenko,*

Summary. The full-scale static test of a continuous flight auger (CFA) pile for vertical

loading by means of numerical modeling is reproduced.

The modeling process can be divided into two stages: determining the calculated boundaries of the soil; identification of mechanical parameters of soils (young's modulus (E), cohesion (c), friction angle (φ)).

The first stage of modeling is to break the grid of finite elements in the plan so that it thickens from the periphery to the continuous flight auger (CFA) pile (in our case, the pitch of the grid varies from 1 m to 10 cm). Then break the finite elements of the array in height with a certain step (in this work, a step of 1m). Then you need to determine how much the height of the soil will be under the pile tip. For this purpose 4 variants are considered: 2,5m; 5m; 10m; 20m. Looking at the results, it can be seen that starting from 10 m and less, deviations within 5%, so we take as a basis the soil thickness of 10 m. Then the size of the soil in the plan was selected. Five options were considered: 5x5m; 10x10m; 20x20m; 30x30m; 40x40m. The basis was 30x30m. As a result of this stage we take 10m under the pile, in the plan 30x30m (the pile is placed in the center).

After establishing the dimensions of the calculation model, we are moving to the identification of the mechanical characteristics of the soil (E , c , φ). Identification of mechanical characteristics of the soil was performed in a layer around the pile 10 cm thick. At the beginning, the young's modulus (E) was identified by linear calculation. It is established if the young's modulus equal to $4E$ it allows to reproduce the results of field tests within the limits of elastic work of soil most precisely. If we take into account the nonlinearity, then our straight line begins to bend. Then, the cohesion (c) was identified, which showed that this indicator does not make a significant contribution to the relationship between load and sedimentation. Therefore, it is accepted to leave the cohesion unchanged. The friction angle (φ) is taken into account with a coefficient of 0.75φ .

Based on the establishment of the size of soil mass and the identified mechanical parameters of the soil, the results of calculations were compared under three conditions strength: Huber-Mises, Drucker-Prager, Mohr-Coulomb.

Key words. Continuous Flight Auger (CFA) piles, cohesion (c), friction angle (φ), young's modulus (E), bored pile, cast-in situ pile, conditions strength.