

Числове моделювання взаємодії бурової палі та основи з врахуванням дилатансії ґрунту

Ігор Бойко¹, Олег Кривенко², Олександр Гаврилюк³

Київський національний університет будівництва і архітектури
31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037,
¹boyko40@ukr.net, orcid.org/0000-0002-6841-0271,
²kryvenko.oa@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0002-1999-2770
³gavryliuk.ov@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0001-7252-0679

DOI: 10.32347/0475-1132.46.2023.9-16

Анотація.

Випробування палі є необхідним та обов'язковим процесом будівництва будівель і споруд, що зводяться на палючих фундаментах. Виникає необхідність у коректній оцінці взаємодії елементів системи «основа-палія» для надійного та ефективного проектування палючих фундаментів.

Використання параметрів ґрунту наданих у звітах з інженерно-геологічних вишукувань, без їх уточнення, призводить до значної розбіжності у результатах числового моделювання взаємодії палі з основою та даних з реальних спостережень за їх осіданнями в наслідок навантажень. Тому є необхідність у ідентифікації розрахункових параметрів прийнятої моделі ґрунту з метою збіжності результатів моделювання з результатами експериментальних досліджень в широкому діапазоні навантажень.

У даній роботі для опису поведінки взаємодії елементів системи «основа-палія» була обрана модель ідеально-пружно-пластичної поведінки ґрунтового середовища з використанням критерія міцності Кулона-Мора. При використанні цієї моделі необхідно враховувати ряд її недоліків, які їй властиві, наприклад неврахування зміни модуля деформації в залежності від зміни напружено-деформованого стану. Також додатково в даній роботі досліджується вплив ефекту дилатансії піщаного ґрунту.

На початковому етапі навантажень в межах до 15% від загального осідання палі (переміщення, що виникає при потенційному зриву палі) суттєвий вклад в її роботу вносить значення модуля деформації (E). На подальших етапах навантаження в ґрунті виникають значні пластичні деформації зсуву, а відповідно ведучими параметрами є параметри міцності ґрунту, в даному випадку питоме зчеплення (c) та кут внутрішнього тертя (ϕ). Так як



Ігор Бойко
професор кафедри
геотехніки
д.т.н.



Олег Кривенко
асистент кафедри
геотехніки



Олександр Гаврилюк
асистент кафедри
геотехніки

в даній роботі бурова палія на значній своїй довжині проходить в межах піщаного ґрунту то важливим також є врахування ефекту дилатансії (ψ) ґрунту.

Приведені результати порівняння натурального випробування бурової палі великого діаметру та їх числового моделювання взаємодії з піщаними ґрунтами та виконана ідентифікація розрахункових параметрів моделі ґрунтового середовища з метою збіжності результатів моделювання з експериментальними даними при відповідних заданих навантаженнях.

Досягнуто збіжність в межах до 5% в широкому діапазоні навантажень на бурову палю.

Ключові слова. Бурова палія, числове моделювання, модуль деформації, кут дилатансії.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Через зростання тенденції до будівництва будівель і споруд у щільній міській забудові пальові фундаменти (а також пильово-плитні) здобули популярність так як вони здатні сприймати великі навантаження від будівлі і передавати на нижче розташовані напластування ґрунтів (як правило з глибиною несуча здатність ґрунту зростає). Серед паль найчастіше використовують бурові (буроін'єкційні та буронабивні) діаметром в діапазоні 620-1500мм.

Для моделювання роботи бурової палі з ґрунтовим масивом необхідно попередньо провести випробування її на вертикальне вдавлююче статичне навантаження, а також 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 більшості випадків виникає значна розбіжність між даними моделювання та польового випробування у напрямку збільшення осідання при відповідному навантаженні, тому 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 ідеально-пружно-пластична модель роботи ґрунту з умовою міцності Кулона-Мора, яка включає в себе такі наступні розрахункові параметри: питому вагу(γ), питоме зчеплення(c), кут внутрішнього тертя(ϕ), кут дилатансії(ψ), модуль деформації (E), коеф. Пуассона(ν). Вище вказані параметри необхідно підібрати таким чином, щоб збіжність результатів моделювання та випробування була в межах 10%. Це в подальшому дає можливість отримати більш достовірні переміщення фундаментів і дозволяє відтворити більш реальну картину перерозподілу зусиль у несучих конструкціях не тільки фундамен-

тів, а й каркасу будівлі в цілому і тим самим забезпечити надійне проектне рішення.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідженнями роботи паль з ґрунтовим масивом займалися Грутман М.С., Бойко І.П. [1, 2], Платонов Е.В., Катценбах Р. [3], Зоценко М.Л. [4, 5].

МЕТА РОБОТИ

Оцінити вплив величин розрахункових параметрів моделі ґрунту, 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.

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

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

Масив ґрунту навколо палі на експериментальному майданчику представлений наступними ґрунтами (згори до низу):

- ✓ ІГЕ-1 – насипний ґрунт (що складається з піска, супіска, суглинка);
- ✓ ІГЕ-2а – супісок пластичний;
- ✓ ІГЕ-16 – пісок дрібний (пилуватий), щільний;
- ✓ ІГЕ-19 – суглинок м'якопластичний.

Інженерно-геологічний розріз з посадкою бурової палі зображено на рис.1.

Фізико-механічні властивості ґрунтів визначались у лабораторних умовах на зразках непорушеної структури та у польових умовах. У ході виконання польових робіт було досліджено ґрунти методом статичного зондування до глибини 39,0м. Статичне зондування проводилось комплектом апаратури «Icone and Icontrol» компанії А.Р. van Berg, що включає в себе зонд СРТу, який одночасно вимірює силу опору ґрунту під конусом зонду (q_c), силу тертя ґрунту по боковій по-

верхні зонду (fs) та тиск води у порах (u) (дивись частину даних вище вказаних вимірів на рис.2).

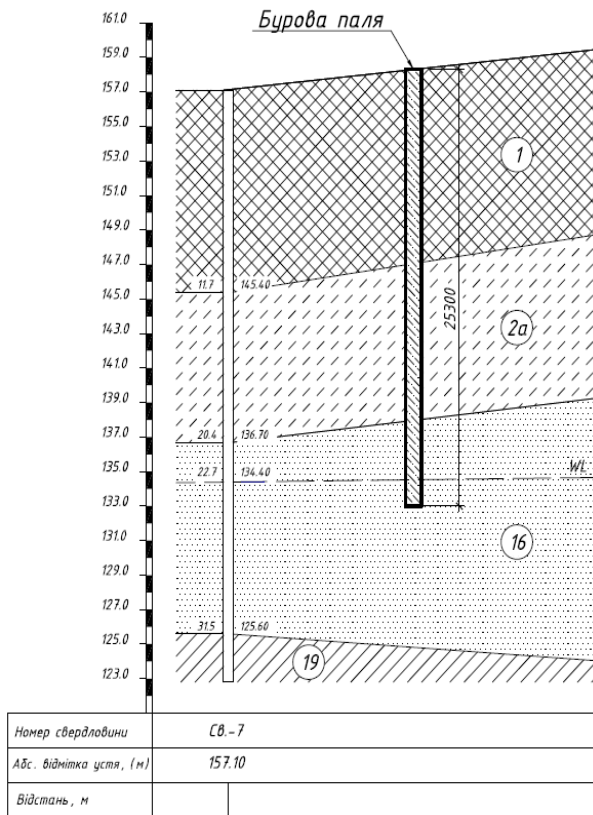


Рис.1. Інженерно-геологічний розріз з посадкою бурової палі.
Fig.1. Engineering-geological section with the planting of a bored pile.

Фрагмент результатів камерального опрацювання даних з інженерно-геологічних вишукувань наведено у таб. 1.

№ ІГЕ	γ_s кН/м ³	Коеф. Пуассона	Кут внутрішнього тертя, °	Питоме зчеплення, кПа	Модуль деформації, МПа
			φ		
1	16.7	0.3	22	7	5
2a	19.6	0.35	24	16	11
16	20.5	0.3	32	1	57
19	20.0	0.38	27	59	29

Табл. 1. Фізико-механічні властивості ґрунтів.
Tab. 1. Physical and mechanical properties of soils.

Нижче на рис.3 зображено розподіл ґрунтів за видами по методиці Робертсона під час статичного зондування.

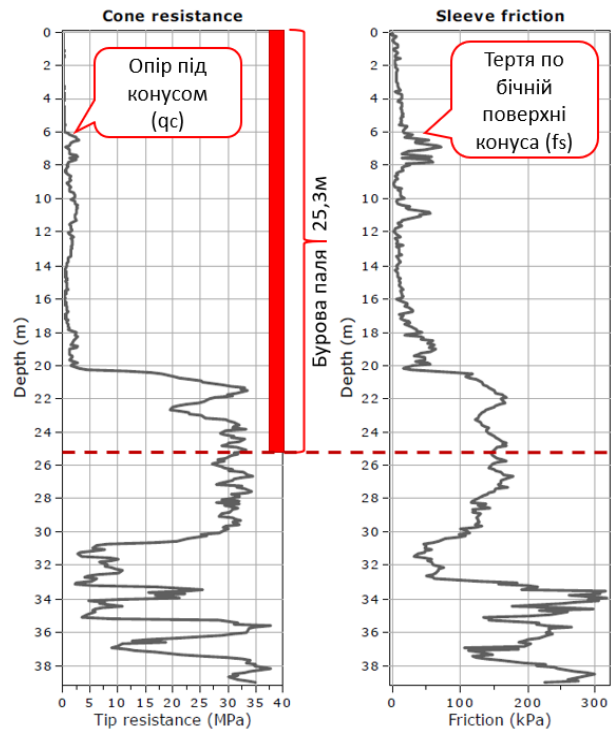


Рис.2. Дані із статичного зондування.
Fig.2. Data of the static sounding.

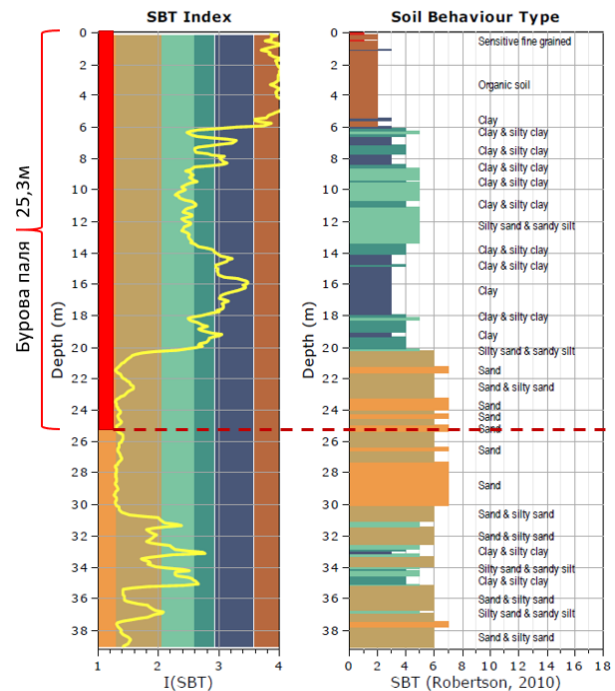


Рис.3. Ідентифікація ґрунтів за Робертсоном.
Fig.3. Identification soils according to Robertson.

Враховуючи той факт, що моделюється одиночна бурова палія діаметром 1,02м і довжиною 25,3м то для розрахунку створена скінчено-елементна модель, яка представлена у вісесиметричній постановці. Оскільки задача вісесиметрична то здава-

лась не вся паля, а тільки її половина (0,51м). В якості скінченних елементів обрані 15-ти вузлові скінченні елементи. За вертикальним розрізом розрахункової моделі ширина ґрунтового масиву 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. Матеріал палі задано з модулем пружності $E=30 \cdot (10^6)кПа$, та коефіцієнтом Пуассона що становить $\nu = 0,2$. П'ята бурової палі знаходиться у ІГЕ-16 (пісок дрібний, пілуватий).

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

- 1) Питома вага (γ), $кН/м^3$;
- 2) Модуль деформації (E), $кПа$;
- 3) Питоме зчеплення (c), $кПа$;
- 4) Кут внутрішнього тертя (ϕ), $^\circ$;
- 5) Кут дилатансії (ψ), $^\circ$ (для піщаних ґрунтів).

Ступені навантаження при моделюванні відповідають ступеням при статичному випробуванні. Максимальне граничне навантаження на палю що було досягнуто становить 1504т.

В першу чергу було проведено числове моделювання взаємодію бурової палі з ґрунтовою основою з використанням прямих значень параметрів наданих у звіті з інженерно-геологічних вишукувань. Це призвело до суттєвої переоцінки осідання палі (дивись рис. 5) в межах робочого діапазону навантажень до 10 разів, а при максимальному граничному навантаженні до 22 разів більше осідання отримане за розрахунком (428,4мм) ніж фактично виміряне в умовах польового випробування палі статичним вдавлюючим навантаженням (19,5мм).

Відповідно виникає необхідність в уточненні розрахункових параметрів моделі ґрунта, а саме модуля деформації (E) який є визначним на першому етапі поведінки палі. Так як модуль (E) відповідає за лінійну ділянку графіка осідання, то необхідно зрозуміти при якому тиску починаються пластичні

деформації, і потім в межах цього тиску ідентифікувати E .

З метою визначення навантаження при якому починаються пластичні деформації було проведено дослідження впливу такого параметра як кута дилатансії (всі інші параметри без змін). Було розглянуто наступні кути дилатансії (ψ) для дрібного піска (ІГЕ-16): 1, 5, 10, 16 градусів. Встановлено наступну особливість: починаючи від 0т і до 600т усі графіки залежності осідання від навантаження співпадають, кут дилатансії (ψ) не впливає; в діапазоні 600-752т розбіжність у переміщеннях на відповідних ступенях навантаження в межах 17%, починає зростати вплив ψ ; після 752т – суттєво різняться, суттєвий вплив ψ . Вище вказане свідчить про те, що в діапазоні 600-752т починає формуватися смуга локалізації зсувних напружень. Тобто за межу лінійної пропорційності між навантаженням і осіданням можна прийняти значення в 21-35% від загального осідання за статичним польовим випробуванням при відповідному максимальному граничному навантаженні (що відповідає діапазону навантажень 600-752т).

Якщо прийняти, що після 21% від загального осідання за випробуванням (ступінь 600т) виникають пластичні деформації то необхідно буде збільшити модуля деформації ґрунтів аж в 30 разів ($30E$) – при цьому отриманий графік при 600т буде мати таке ж осідання (4,1мм) як при стичному випробуванні, але при максимально граничному навантаженні 1504т – 24,4мм. При модулі $30E$ для подальшої збіжності результатів необхідно призначити кут дилатансії рівним $\psi = 1,5$. Але тут є свої недоліки: з аналізу отриманих результатів виявлено, що починаючи з 600т осідання зменшуються на 20% від натурних випробувань; з досвіду проектування при застосуванні кута дилатансії (ψ) його величина знаходиться в межах (1/3 - 1/2) від кута внутрішнього тертя (ϕ), тобто в нашому випадку для ІГЕ-16 цей діапазон 10-16 градусів; значне збільшення модулів ($30E$).

Тому наступним етапом за межу прямої

пропорційності було прийнято 35% від загального осідання за польовим випробуванням (ступінь 752т). Щоб на цій ступені осідання відповідало даним з випробування (6,7мм) було проведено серію розрахунків за якою було прийнято, що збільшення модуля деформації в 12 разів (по відношенню до наведеного у звіті з інженерно-геологічних вишукувань) призводить до задовільної кореляції даних числового моделювання та польового випробування в діапазоні навантажень до половини максимального навантаження. Але при подальшому збільшенні навантаження максимальне осідання склало - 45,5мм, і тому відповідно виникає необхідність у ідентифікації не тільки параметрів деформації ґрунту, а і параметрів міцності. З урахуванням того, що ми маємо справу з піщаним ґрунтом в основі палі то важливим ефектом для нього є дилатансія. Щоб досягти кращої кореляції графіків натурних випробувань і числового моделювання було враховано для ІГЕ-16 кут дилатансії рівним 11 градусам (див. рис. 6). Даний варіант є точнішим за попередній, так як: починаючи з навантаження 800т (діапазон робочого навантаження) точність даних знаходиться в межах 5%; графік за моделюванням не занижує реальні осідання; кут дилатансії в межах (1/3 - 1/2) ϕ ; більш коректна величина модулів (12E).

Необхідно зазначити, що в даній роботі такі параметри як питоме зчеплення (c) та кут внутрішнього тертя (ϕ) не змінювались і лишились такими якими їх надали інженери геологи. Це пояснюється тим, що ці параметри зазвичай занижують з метою збільшення значень осідання при відповідних ступенях навантаження, а в нашому випадку значення осідання необхідно було зменшувати і в умові міцності Кулона-Мора це можна досягти тільки використовуючи кут дилатансії піска (ψ).

В табл. 2 вказано остаточні ідентифіковані розрахункові параметри ґрунтів для відповідності результатів моделювання та статичного випробування палі на вертикальне вдавлююче навантаження (γ , ν , ϕ , c -

без змін).

Таким чином нами встановлено, що для збіжності в широкому діапазоні навантажень графіків польового випробування палі статичним навантаженням та його відповідного числового моделювання в межах 5% необхідно модуль деформації збільшувати в 10-12 разів та враховувати кут дилатансії ґрунту в межах до 1/3 від значення кута внутрішнього тертя (ϕ). Вище вказане відображено на рис. 6.

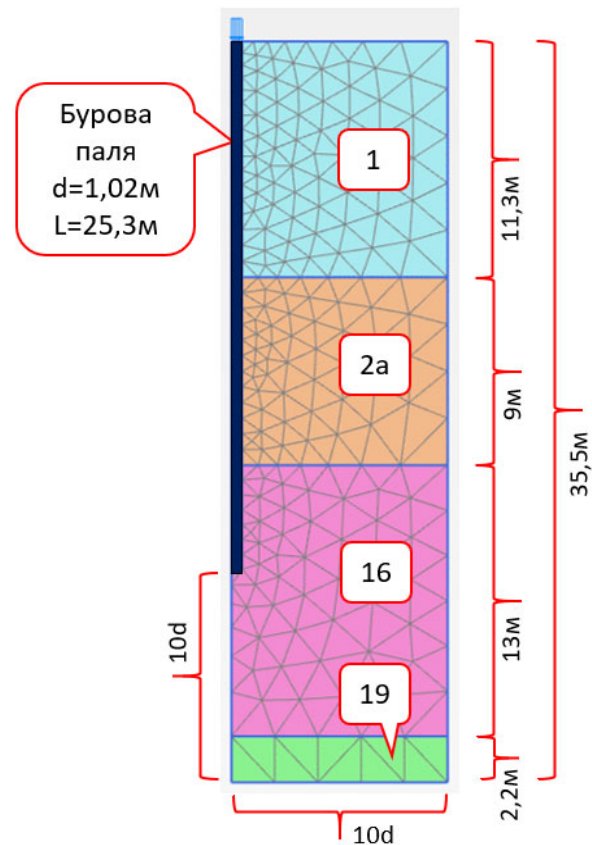


Рис.4. Розрахункова модель системи «основа – бурова паля».

Fig.4. Calculation model of system "base - bored pile".

Табл. 2. Ідентифіковані параметри ґрунтів для умови міцності Кулона-Мора.

Table 2. Identified soil parameters for the Mohr-Coulomb strength condition

№ ІГЕ	γ , кН/м ³	Коеф. Пуассона	Кут внутр. тертя, °	Питоме зчеп., кПа	Модуль деф., МПа	ψ , кут дилат., °
		ν	ϕ	c	E	
1	16.7	0.3	22	7	60	0
2a	19.6	0.35	24	16	132	0
16	20.5	0.3	32	1	684	11
19	20.0	0.38	27	59	348	0



Рис.5. Співставлення графіків натурального випробування бурової палі та числового моделювання з розрахунковими параметрами ґрунтів взятих із звіту без їх ідентифікації.

Fig.5. Comparison graphs of field test of the bored pile and numerical modeling with calculated parameters of soils taken from the report without their identification.

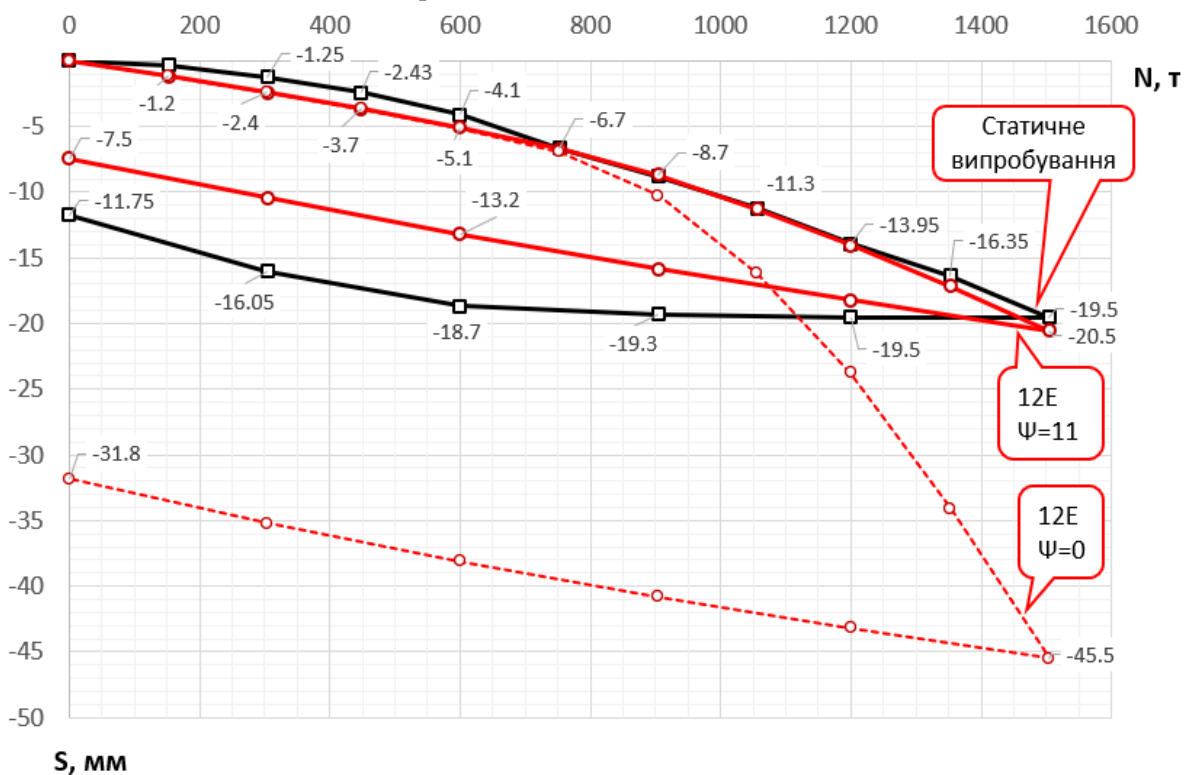


Рис.6. Співставлення графіків натурального випробування бурової палі та числового моделювання з розрахунковими параметрами ґрунтів із ідентифікацією.

Fig.6. Comparison graphs of field test of the bored pile and numerical modeling with calculated soil parameters with their identification.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

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

Показано, що використання прямих значень параметрів ґрунтів наданих у звіті з інженерно-геологічних вишукувань при числовому моделюванні взаємодії елементів системи «основа – бурова паля» може призвести до суттєвого збільшення осідання її в межах робочого діапазону навантажень до 10 разів, а при максимальному навантаженні до 22 разів. Тому для збіжності результатів моделювання та натурального випробування необхідно проводити ідентифікацію розрахункових параметрів ґрунтів.

Встановлено, що на початковому етапі навантажень в межах 10-15% від загального осідання палі суттєвий внесок в її роботу вносить значення модуля деформації (E). Виявлено, що збільшення модуля деформації в 12 разів (по відношенню до наведеного у звіті з інженерно-геологічних вишукувань) призводить до задовільної кореляції даних числового моделювання та польового випробування в діапазоні навантажень до половини максимального навантаження.

Досліджено, 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 (ψ). Для кращої збіжності результатів кут дилатансії прийнятий рівним $1/3$ від кута внутрішнього тертя (ϕ).

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

ЛІТЕРАТУРА

1. Бойко І.П. Сопротивление просадочных ґрунтов для расчета буройнекссионных свай / И.П.Бойко, А.Е.Дельник, А.Л.Козак, Н.И.Орленко // *Республиканский межведомственный научно-технический сборник «Основания и фундаменты»*. Випуск 223. – К.: Будівельник, 1990, с. 5-9.
2. Бойко І.П. Методи випробувань ґрунтів за допомогою буройнексційної палі великого діаметру / І.П. Бойко, Ю.В. Карпенко, С.М. Новофастовський // *Основи і фундаменти: Міжвідомчий науково-технічний збірник*. – Вип. 328 – К.: КНУБА, 2004. – 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. Досвід використання буройнексційних палей в водонасичених лесових ґрунтах / Л.М. Зоценко, В.П. Левченко, В.М. Зоценко // *Строительная наука и техника* – Вип. № 3(18) – Минск, 2008. – С.23.
5. Зоценко Л.М. Особливості влаштування буройнексційних палей 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.

REFERENCES

1. Boyko I.P., Delnik A.E., Kozak A.L., Orlenko N.I. (1990). Soprotivlenie prosadochnyih gruntov dlya rascheta buroyineksсионnyih svay [Resistance of collapsible soils to calculate continuous flight auger piles]. *Respublikanskiy mezhhve-domstvennyiy nauchno-tehnicheskiiy sbornik «Osnovaniya i fundamenti»*. Kyiv: Budivelnik, 223, 5-9 (in Russian).
2. Boyko I.P., Karpenko Yu.V., Novofastovskyi S.M. (2004) Metody vyprobuvan ґruntiv za dopomohoiu buroyineksiinoi pali velykoho diametru [Methods of soil tests using large-diameter continuous flight auger piles] *Osnovy i fundamenti: Mizhvidomchyi naukovotekhnichnyi zbirnyk*. Kyiv: KNUBA, 328, 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., Levchekno V.P., Zotsenko V.M. (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., Levchenko V.P., Bida S.V., Perederii M.F. (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 mashi-nobuduvannya, budl'vnitstvo)*. Poltava: PNTU, 76 (in Ukrainian).

Numerical simulation of interaction bored pile and soil mass with taking into account the dilatancy of the soil

Igor Boyko,
Oleg Krivenko,
Oleksandr Gavryliuk,

Summary. Pile testing is a necessary and mandatory process of construction buildings and structures erected on pile foundations. There is a need for a correct assessment of the interaction of the elements of the "foundation-pile" system for the reliable and effective design of pile foundations.

The use of soil parameters provided in reports on engineering and geological investigations, without their clarification, leads to a significant discrepancy in the results of numerical modeling of the interaction of piles with the foundation and data from real observations of their settlement as a result of loads. Therefore, there is a need to identify the calculated parameters of the adopted soil model in order to match the simulation results with the results of experimental studies in a wide range of loads.

In this paper, a model of ideal elastic-plastic behavior of the soil environment using the Mohr-Coulomb strength criterion was chosen to describe the interaction behavior of the elements of the "foundation-pile" system. When using this model,

it is necessary to take into account a number of its inherent shortcomings, for example, not taking into account the change of the young's modulus depending the change of the stress-strain state. Additionally, this work examines the influence of the dilatancy effect of sandy soil.

At the initial stage of loads up to 15% of the total settlement of the pile (displacement resulting from potential pile failure), the value of the young's modulus (E) makes a significant contribution to its operation. At the later stages of loading, significant plastic shear deformations occur in the soil, and accordingly, the leading parameters are the soil strength parameters, in this case, the specific cohesion (c) and the friction angle(φ). Since in this work the drill pile passes through sandy soil for a considerable length, it is also important to take into account the effect of soil dilatation(ψ).

The results of a comparison field test of the bored pile with large-diameter and their numerical simulation of interaction with sandy soils are presented, and the calculation parameters of the soil environment model are identified in order to match the simulation results with experimental data at the corresponding specified loads.

A convergence of up to 5% was achieved in a wide range of loads on the bored pile.

Key words. Bored pile, numerical modeling, young's modulus, dilatancy angle.