

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПРИ ПЕНЕТРАЦІЇ ТА СТАТИЧНОМУ ЗОНДУВАННІ РОЗШИРЕНИМ НАКОНЕЧНИКОМ ҐРУНТОЦЕМЕНТНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Наведено результати дослідження та числового моделювання напружено-деформованого стану в системі ґрунтоцемент – наконечник зонда при статичному зондуванні розширеним наконечником.

Ключові слова: *контроль якості, ґрунтоцемент, статичне зондування розширеним наконечником, моделювання.*

Постановка проблеми. При будівництві та реконструкції суттєва частина витрат припадає на влаштування фундаментів і підготування ґрунтових масивів, тому необхідно забезпечувати все більш високі вимоги до продуктивності технологічних операцій та якості продукції. Необхідність підвищення темпів вишукувань певним чином пов'язана з економічною роллю яку вони відіграють в будівельному інвестиційному циклі в цілому. Дослідження і проектування представляють етапи, які, не вимагають великих матеріальних витрат, але пов'язані зі значними витратами часу. З цієї причини тривалість вишукувань і проектування в певних випадках може набути навіть більшого економічного значення, ніж їх вартість. Збільшення лише на 1 місяць тривалості інвестиційного циклу викликає подорожчання будівництва приблизно на 1–2 %. Це відбувається за рахунок додаткових платежів за кредитами і зниження темпів оборотності капіталовкладень. Якщо врахувати, що вартість інженерно-геологічних вишукувань у більшості випадків становить лише 0,5...1 % від загальної кошторисної вартості будівництва, стає очевидним виняткове значення збільшення темпів вишукувальних робіт.

Останнім часом для закріплення ґрунтових масивів набуває широкого вжитку метод їх армування ґрунтоцементними елементами (ҐЦЕ), які у сучасному будівництві виготовляються за двома основними технологіями: бурозмішувальною і струменевою. При цьому необхідно мати максимально повну інформацію з будівельних характеристик ґрунтоцементних елементів та ґрунтів всього масиву, як на проектній стадії, так і під час випробувань якості проведених робіт.

Підвищення якості, зменшення термінів і собівартості виготовлення ґрунтоцементних елементів та паль невід'ємно пов'язані з проблемами обрання матеріалів та ефективного використання обладнання для їх виготовлення.

Раціональне застосування швидких і дешевших «експрес-методів» вивчення ґрунту, до яких відноситься статичне зондування розширеним наконечником (СЗРН), є найбільш доцільним засобом скорочення тривалості інженерних вишукувань. Часткова заміна свердловин і дорогих випробувань на статичне зондування, як правило, забезпечує скорочення термінів вишукувальних робіт навіть при значному збільшенні числа точок зондування.

Отже, дослідження аспектів застосування методу статичного зондування розширеним наконечником, як для вихідного ґрунту, так і для ҐЦЕ є актуальною науковою задачею.

Зв'язок з науковими і практичними завданнями та аналіз останніх досліджень і публікацій. Розвитку швидкісних методів досліджень, до яких відносяться методи пенетрації та зондування, сприяли роботи П.А. Ребіндера, М.А. Цитовича, В.Г. Березанцева. Великий внесок у розвиток цих методів вніс Разорьонов В.Ф., у роботах якого детально розглянуто питання теорії та практики пенетраційних випробувань. Проблеми статичного зондування досліджувались у роботах: Г. Санглера, Т. Лунна, П.К. Робертсона, Д.Д.М. Пауелла,

С.Є. Бернса, П.У. Мейна, Г.К. Бондарика, Ю.Г. Трофімовкова, Л.Н. Воробкова, В.І. Ферронського, М.С. Захарова, М.Л. Зоценка, М.М. Вагідова, І.Б. Рижкова, О.И. Ісаева.

У практиці проектування для ґрунтоцементних елементів за основний показник якості прийнята міцність, що визначається величиною опору зразків одновісному стиску.

Вперше метод статичного зондування для дослідження ґрунтоцементу був використаний у роботі [1]. В цій роботі запропоновано емпіричну формулу для визначення міцності ґрунтоцементу при одновісному стисненні за даними зондування:

$$\sigma_{сж} = 0,12 + 0,1 \cdot q_3, \quad (1)$$

де q_3 – питомий опір ґрунту під наконечником зонда при статичному зондуванні розширеним наконечником $q_{зр}$ визначається як опір ґрунту наконечнику зонда віднесений до квадрата висоти конуса $h_{кон}$.

Для контролю постійності перерізу паль за глибиною була запропонована методика порівняння опорів зондуванню ґрунту в природному стані та тіла ґрунтоцементної палі проведеного через 5 годин після її виготовлення. За цього терміну опір зондуванню тіла ґрунтоцементної палі менший в порівнянні з опором ґрунту в природному стані. Але слід також відзначити такі недоліки вищенаведеної методики як: неврахування на ранньому етапі тужавіння нерівномірної вологості оточуючого ґрунту, що може призвести до невірних висновків; значне зусилля зондування на пізньому етапі тужавіння, що може призвести до руйнування досліджуваного ГЦЕ.

У роботі [2] вперше для дослідження ґрунтоцементу був запропонований метод СЗРН та у лабораторних умовах за допомогою методу пенетрації була встановлена функціональна залежність для визначення міцності ґрунтоцементу від віку тужавіння (T , діб) та температури тужавіння ґрунтоцементу (t , °C):

$$\sigma_{ст} = 0,576 + 0,0128 \cdot t - 0,7322 \cdot e^{-0,04373 \cdot T}, \text{ МПа.} \quad (2)$$

Також була встановлена для досліджуваного ґрунтоцементу залежність лінійного характеру між питомими опорами пенетрації та зондування:

$$q_{зр} = 0,001458 + 1,1458 \cdot R, \quad (3)$$

де $q_{зр}$ – питомий опір зондуванню розширеним наконечником, що визначається як опір ґрунту наконечнику зонда віднесений до квадрата висоти конуса, МПа; R – питомий опір пенетрації, МПа.

Контроль за якістю ГЦЕ можна виконувати користуючись залежністю:

$$q_{зр} = 4,538 \cdot 10^{-2} + 1,083 \cdot 10^{-3} \cdot t - 6,153 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-0,04373 \cdot T}. \quad (4)$$

У роботі [3] залежності питомого опору зондуванню розширеним наконечником ГЦЕ підтверджені в умовах будівельного майданчика при реконструкції будівлі ресторану «Іванова гора» у м. Полтава. Також під час досліджень було виявлено явище підвищення міцності у верхніх шарах ГЦЕ, обумовлене підвищенням вмістом цементу і більш високими температурними умовами тужавіння ґрунтоцементної суміші.

Формулювання цілей статті. Питання визначення та прогнозування характеристик міцності ґрунтоцементних елементів на цей час вивчене у недостатньо повному обсязі, особливо при паралельному використанні різних за достовірністю методів досліджень та вихідних компонентів ґрунтоцементу. Можна чекати, що в цьому напрямку існують значні можливості ефективнішого врахування особливостей конкретних майданчиків, вихідних компонентів і достовірності методів, які використовуються для контролю якості. Отже, для вирішення вказаних питань необхідно мати як експериментальний метод визначення характеристик ґрунтоцементного матеріалу виготовленого в лабораторних та польових умовах, так і теоретичний метод чисельного моделювання пенетрації та СЗРН.

Ці методи досліджень повинні давати достовірні дані як вихідного ґрунту, так і ґрунтоцементу протягом часу від моменту його виготовлення до часу набуття проектних па-

раметрів. Метою даної роботи є теоретичне дослідження напружено деформованого стану методом чисельного моделювання penetрації та СЗРН.

Виклад основного матеріалу. Пенетрацією називається метод дослідження фізичних і механічних властивостей матеріалів шляхом визначення їх опору проникненню наконечників різноманітних форм і розмірів. У випадку, коли глибина занурення наконечника не перевищує його висоти, метод має назву penetрації. Якщо глибина занурення наконечника перевищує його висоту він зветься зондуванням [4, 5]. Відмінність в термінології відображає принципову різницю в графіках «зусилля penetрації (зондування) P – глибина занурення наконечника h », що характеризують умови деформації ґрунту в процесі penetрації або зондування (рис. 1). В процесі penetраційних випробувань площа поперечного перетину конічного наконечника при його зануренні в ґрунт безперервно зростає. Тому поки глибина занурення наконечника буде менше його висоти $h < h_{\text{кон}}$, представляє, наприклад в зв'язних ґрунтах, квадратну параболу (рис. 1, а). При глибині занурення наконечника, що перевищує його висоту $h > h_{\text{кон}}$, площа поперечного перетину наконечника залишається незмінною, тому подальше збільшення зусилля зондування в зв'язних однорідних ґрунтах припиняється, тому графік залежності $h = f(P)$ графік залежності $h = f(P)$ отримує різкий перелом.

Замість параболічної залежності (0–1) встановлюється проста залежність P – $P_{\text{макс}}$, тобто зусилля зондування в однорідних зв'язних ґрунтах, що володіють відносно значним зчепленням, виявляється не залежним від глибини занурення наконечника (пряма 2–3 на рис. 1, б). У незв'язних (піщаних) ґрунтах з однорідними характеристиками механічних властивостей по глибині зондування за умови $h > h_{\text{кон}}$ і $d_{\text{кон}} \gg d_{\text{шт}}$ призводять до лінійного збільшення зусилля зондування з глибиною занурення наконечника (пряма 2–3' на рис. 1, б). У якості об'єктивної характеристики результатів penetраційних випробувань прийнята величина «питомого опору penetрації R » яка визначається як величина прикладеного зусилля P віднесена до квадрата глибини занурення конуса h^2 .

Для досліджуваного стану ґрунтоцементу, як і для вихідного матеріалу — однорідних глинистих ґрунтів, питомий опір penetрації має властивість інваріантності, тобто не залежить від величини зусилля penetрації, що можна бачити на рис. 2, де показані графіки залежності глибини занурення наконечника від прикладеного зусилля в координатах P – h^2 і які мають вигляд прямих. Отже, питомий опір penetрації визначається як тангенс кута нахилу θ цих прямих до вісі ординат:

$$R = \text{tg } \theta = (P \pm P_0) / h^2, \quad (5)$$

Для теоретичного дослідження напружено деформованого стану методом чисельного моделювання penetрації та СЗРН доцільно використати метод скінченних елементів (МСЕ), який набув останнім часом широкого вжитку. МСЕ є основою розрахункового механізму багатьох програмних продуктів для комп'ютерного моделювання, які використовують для оцінювання НДС ґрунтових масивів: Plaxis, CONCORD, Основа–1 (розробка ПолтНТУ), Start–2, Нелінійний Поліфем, GeoStab, LANDSLIP07, Lira, тощо.

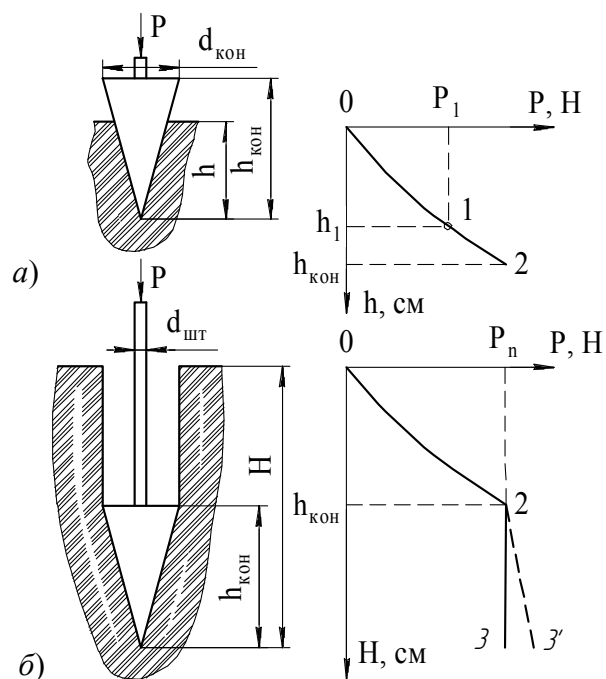


Рис. 1. Схеми дослідження методами:
а – penetрації, б – зондування

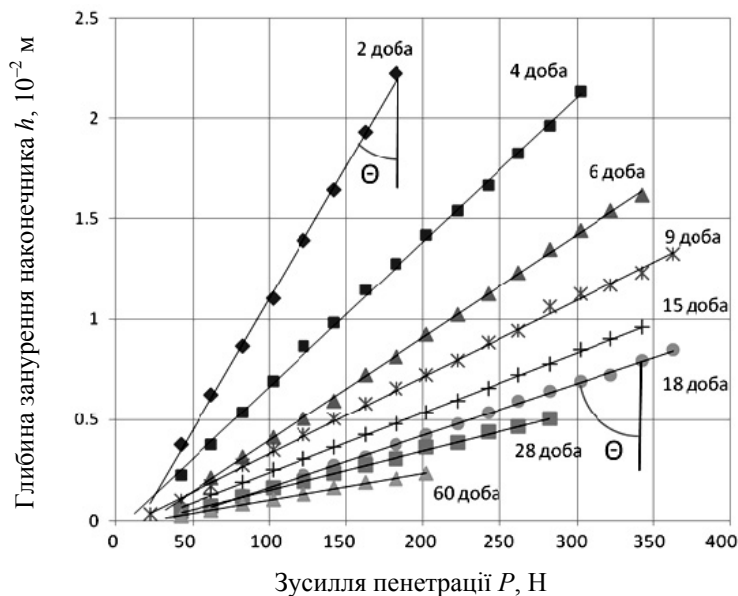


Рис. 2. Графіки інваріантності питомого опору penetрації зразків ґрунтоцементу різного терміну тужавіння

Для моделювання був обраний програмний комплекс Plaxis, що призначений для аналізу деформацій та стійкості геотехнічних споруд і використовується для розв'язання різноманітних задач в галузі традиційної та нелінійної механіки ґрунтів.

Автор висловлює подяку заступнику директора з наукової роботи НДІ «БашНІ» м. Уфа (Росія) д.т.н., професору А.Л. Готману за надану можливість користуватися ліцензійними розрахунковими комплексами «Plaxis 8.2».

Згідно з ДБН В.2.1-10-2009 були складені скінченно-елементні моделі для пенерації (для глибин занурення від 10 до 60 мм, з кроком 5 мм) і СЗРН (для глибин занурення від 80 до 1000 мм) у двовимірній вісесиметричній постановці задачі, призначені властивості матеріалів та вказані граничні умови (рис. 1, 2).

Для дослідження, як вихідний матеріал, був обраний суглинок лесований, світло-жовтий, високопористий, карбонатний, просадочний, в природному заляганні твердий, а у водонасиченому — м'якопластичний, що має наступні міцнісні характеристики: питома вага $\gamma = 18,0 \text{ кН/м}^3$; модуль деформації $E = 5 \text{ МПа}$; питоме зчеплення $c = 11,8 \text{ кПа}$; кут внутрішнього тертя $\phi = 6^\circ$; коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,35$; кут дилатансії $\psi = 0^\circ$.

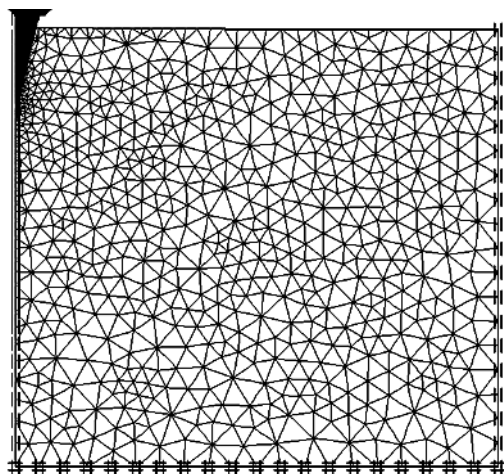


Рис. 3. Скінченно-елементна модель penetрації

Для моделювання процесів penetрації та СЗРН доцільним є застосування традиційної моделі ґрунту Мора – Кулона у вигляді пружно-пластичного середовища, яка потребує наступних вихідних даних: модуля деформації, питомого зчеплення, кута внутрішнього тертя, коефіцієнта Пуассона, кута дилатансії.

Приклад побудови скінченно-елементної моделі для визначення опору penetрації показаний на рис. 3.

Ґрунтоцемент виготовлений з цього ґрунту, з вмістом 10 % від ваги скелету ґрунту портландцементу ПЦ ІІ/Б-Ш-400 та водо-цементним відношенням В/Ц = 2,7, має наступні міцнісні характе-

ристики: питома вага $\gamma = 18,2 \text{ кН/м}^3$; модуль деформації $E = 100 \text{ МПа}$; питоме зчеплення $c = 130 \text{ кПа}$; кут внутрішнього тертя $\varphi = 35^\circ$; коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,2$; кут дилатансії $\psi = 0^\circ$.

При моделюванні процесу СЗРН для врахування напружень, що виникають від тиску ґрунту витисненого при утворенні свердловини, використовувався режим «поетапного будівництва». Після генерації початкових напружень від ваги ґрунту (рис. 4, а) на другому етапі ґрунтові кластери конусу та свердловини вимкнені, а до межі свердловини прикладене переміщення, що імітує витискання ґрунту при утворенні свердловини (рис. 4, б). Наприкінці цього етапу переміщення кінцевих елементів із збереженням напружень приводяться в початкове положення відповідною опцією. На третьому етапі межа основи конуса фіксується нульовим переміщенням і моделюється напружений стан «розвантаження» ґрунту вздовж свердловини з частковим витисканням його у порожнину свердловини (рис. 4, в). Четвертий етап для penetрації та зондування має однаковий принцип: до основи конуса прикладається задане вертикальне переміщення (рис. 4, г).

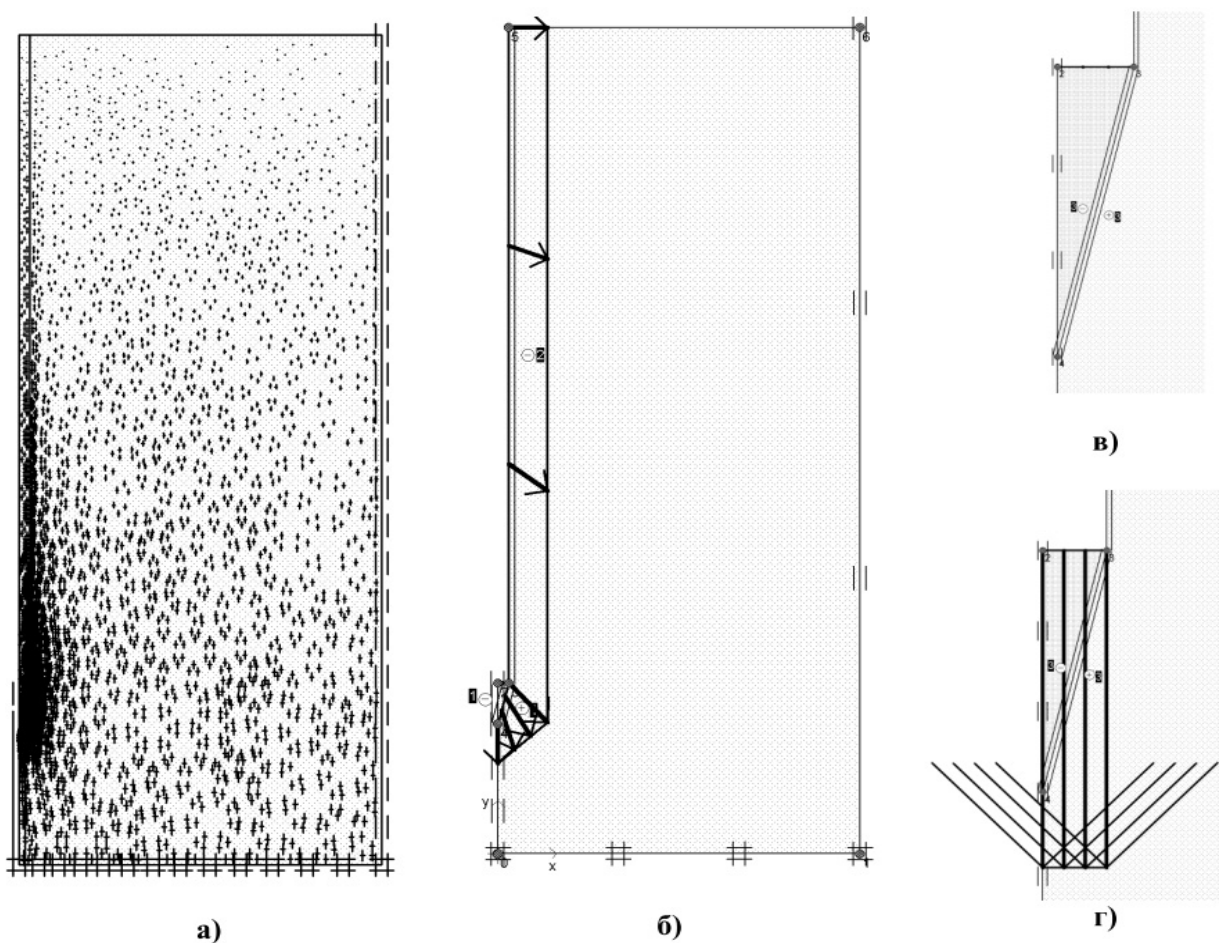


Рис. 4. Фази моделювання:

а – генерація початкових напружень від ваги ґрунту; б – розрахункова схема для генерації напружень від ґрунту витисненого при утворенні свердловини; в – фіксація конуса нульовим переміщенням та «розвантаження»; г – розрахункова схема для визначення зусилля опору зондуванню

Результатами моделювання penetрації та СЗРН в «Plaxis» є значення переміщень точки в центрі основи конуса та відповідні вертикальні зусилля, за якими далі будуються графіки залежностей «переміщення – зусилля» у логарифмічних координатах. Аналогічні графіки будуються при обробці результатів випробувань в лабораторних умовах на одно-площинний зріз при визначенні міцнісних характеристик.

Приклад одного із графіків залежності сили опору ґрунту penetрації від збільшення глибини занурення наконечника за результатами моделювання наведено на рис. 5. Побудова графіків в логарифмічних координатах дозволяє точніше виявити значення зусилля, які відповідають втраті структурної міцності, що визначається довготривалою межею міцності.

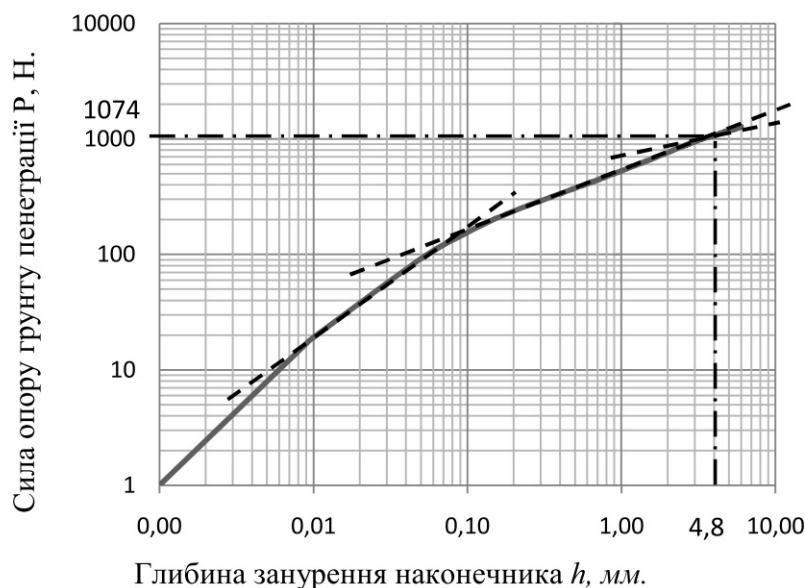


Рис. 5. Графік залежності сили опору ґрунту penetрації $\lg P$ від збільшення глибини занурення наконечника $\lg \Delta h$

Таблиця 1. Результати моделювання процесу penetрації

h , мм	P , Н	R_b , МПа
10	283	2,83
15	503	2,23
20	798	1,99
25	1074	1,72
30	1539	1,71
35	2174	1,77
40	2752	1,72
45	3236	1,60
50	3946	1,58
55	4725	1,56
60	5969	1,66
	R , МПа	1,85

Таблиця 2. Результати моделювання процесу СЗРН

H , мм	P , Н	$q_{зр}$, МПа
80	7093	1,97
100	7370	2,05
120	7476	2,08
140	7954	2,21
160	7985	2,22
180	8199	2,28
200	8230	2,29
250	8218	2,28
300	8287	2,30
350	8771	2,44
400	8915	2,48
500	8953	2,49
600	9079	2,52
800	9738	2,71
1000	9801	2,72

На рис. 6. наведені картини розподілу повних векторних переміщень, напружень, що знаходяться на поверхні обвідної руйнування Кулона та повних середніх напружень.

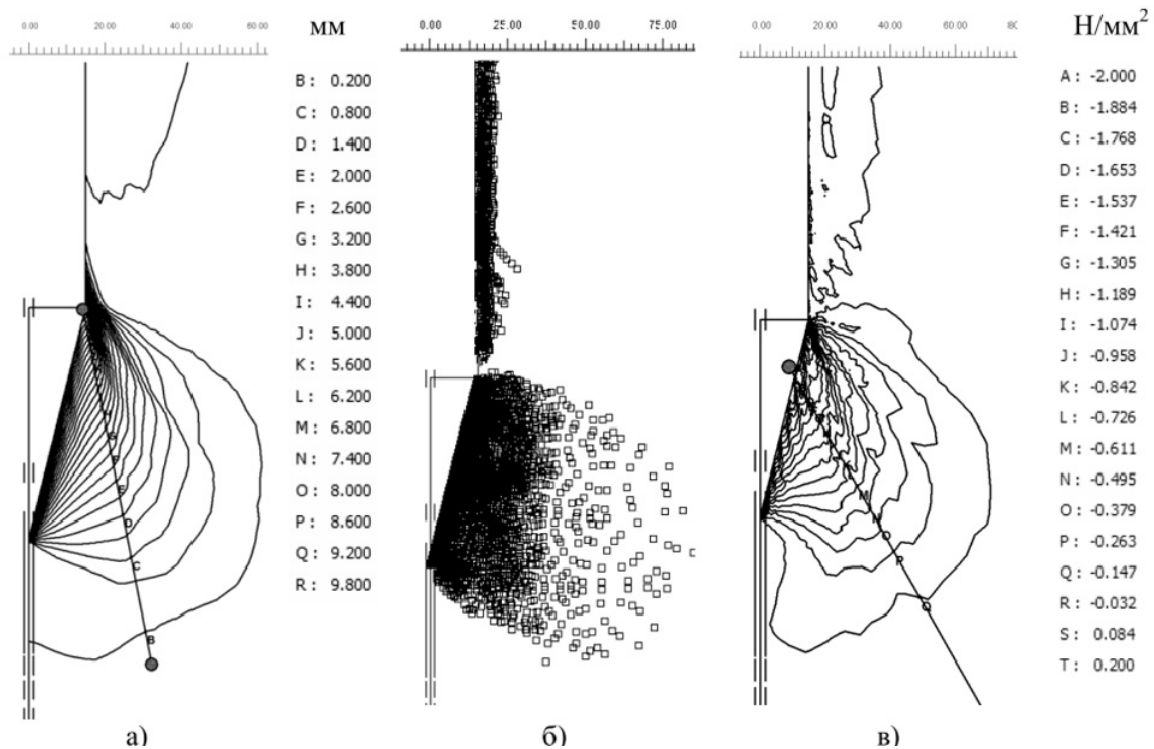


Рис. 6. Картини розподілу:
повних векторних переміщень (а), напружень, що знаходяться на поверхні
обвідної руйнування Кулона (б), повних середніх напружень (в)

На рис. 7. наведений графік змодельованої залежності сили опору penetрації та зондуванню від глибини занурення наконечника.

Порівняння результатів лабораторних та польових досліджень ґрунтоцементних елементів методом СЗРН із результатами моделювання дозволяє стверджувати, що побудована модель має достатній рівень адекватності, оскільки коефіцієнт варіації при польових дослідженнях сягає значень 7...9 % внаслідок неоднорідності як вихідного ґрунту, так і отриманої ґрунтоцементної суміші.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Розроблена у пакеті кінцево-елементного аналізу Plaxis модель дозволяє досліджувати напружено-деформований стан системи ґрунтоцемент – наконечник зонда.

У подальших дослідженнях необхідно встановити залежності зміни під час тужавіння таких показників як модуль деформації, питоме зчеплення, кут внутрішнього тертя, а також дослідити вплив збіднених прошарків ґрунтоцементу або ґрунту.

Сила опору ґрунту penetрації та зондуванню P, H .

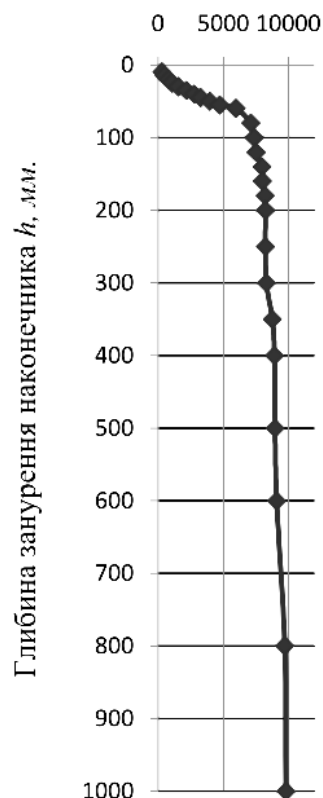


Рис. 7. Графік залежності сили опору ґрунту penetрації та зондуванню від глибини занурення наконечника

Література

1. Коган, В.В. Применение статического зондирования для контроля качества свай при струйной технологии [Текст] / В.В. Коган, Б.В. Гончаров, Н.Б. Гареева // Эффективные фундаменты, сооружаемые без выемки грунта: тр. II Укр. науч.-техн. конф. по механике грунтов и фундаментостроению. – Полтава: ПолтНТУ. – 1995. – Ч. 1. – С. 100–103.

2. Зоценко, М.Л. Пенетрационные исследования процесса твердения грунтоцемента [Текст] / М.Л. Зоценко, С.Г. Ясько // Строительство, материаловедение, машиностроение. – Днепропетровск: ГВУЗ «Приднепровская гос. акад. строительства и архитектуры», 2012. – №65. – С. 245–252.

3. Ясько, С.Г. Контроль якості грунтоцементних елементів методом статичного зондування розширеним наконечником [Текст] / С.Г. Ясько, В.М. Зоценко // Галузеве машинобудування, будівництво: зб. наук. пр. Полтавського нац. техн. ун-ту ім. Ю.Кондратюка. – Вип. 4 (34). – Т. 2. – ПолтНТУ, 2012. – С. 149–156.

4. Разоренов, В.Ф. Определение строительных свойств грунтов методами пенетрации и вращательного среза [Текст] / В.Ф. Разоренов. – Киев: Будівельник, 1967. – 136 с.

5. Зоценко, Н.Л. Исследование особенностей определения физико-механических свойств песчаных грунтов методами пенетрации и зондирования: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Николай Леонидович Зоценко; Воронежский инж.-строит. ин-т. – Воронеж, 1969. – 36 с.

© С.Г. Ясько

С.Г. Ясько, ст. преп.

Полтавский национальный технический университет им. Юрия Кондратюка

ЧИСЛОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ПЕНЕТРАЦИИ И СТАТИЧЕСКОМ ЗОНДИРОВАНИИ РАСШИРЕННЫМ НАКОНЕЧНИКОМ ГРУНТОЦЕМЕНТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Приведены результаты исследования и числового моделирования напряженно-деформированного состояния в системе грунтоцемент – наконечник зонда при статическом зондировании уширенным наконечником.

Ключевые слова: контроль качества, грунтоцемент, статическое зондирование расширенным наконечником, моделирование.

S.G. Yasko, Senior Lecturer

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

NUMERICAL MODELING OF SOIL CEMENT ELEMENTS DEFLECTED MODE DURING CONE PENETRATION TEST WITH AN EXPANDED

The results of the research and numerical simulation of soil cement – probe tip system's deflected mode during static probing with an expanded tip are provided.

Keywords: quality control, soil cement, static probing with an expanded tip, modeling.