

УДК 624.131.38

М.Л. Зоценко, В.Г. Іванченко

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, м. Полтава

ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ДЕФОРМУВАННЯ ҐРУНТУ ПРИ ПРЕСІОМЕТРИЧНИХ ВИПРОБОВУВАННЯХ

У роботі наведені результати обчислювального експерименту пресіометричних випробовувань лесованого суглинку. В процесі експерименту змінювали тиск на ґрунт, площу і співвідношення сторін зонду гідравлічного пресіометра. За допомогою статистичних методів встановлені відповідні залежності, які впливають на деформації ґрунту. Проведені обчислювальні експерименти підтвердили, що для пресіометричних випробовувань при стисненні ґрунту в горизонтальному напрямку діють ті ж закономірності, що і для штампів при вертикальному навантаженні.

Ключові слова: обчислювальний експеримент, штамп, пресіометр, пресіометричний зонд, деформації, параметри зонду.

Постановка проблеми

У польових умовах дослідження стисливості основ проводиться штампами різних розмірів. Стандартним вважається жорсткий круглий штамп площею 5000 см². Такий штамп використовується переважно при дослідженнях з поверхні Землі, або з відмітки дна котловану. При необхідності дослідження більш глибоких шарів основи для встановлення штампів необхідно буріння свердловин великого діаметру, або проходження шурфів для встановлення штампів [1]. При пошаровому дослідженні основ необхідна циклічність процесу «буріння свердловини – випробовування штампом». На наш погляд більш технологічними слід вважати випробовування ґрунтів пресіометрами у свердловинах, які попередньо пробурені на усю глибину досліджень. Відмінність штампів і пресіометричних досліджень полягає в навантаженні ґрунтів у перпендикулярних напрямках. Для штампів випробовувань закономірності зміни напружено-деформованого стану ґрунтів в процесі вертикального їх навантаження достатньо вивчені [2]. У той час як для пресіометрії ці питання ще не вирішені. Вплив анізотропії ґрунтів, розміру і форми зонду, гравітаційних сил ґрунту – для пресіометрів практично не досліджені [3-7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Використання штампів стандартних розмірів для оцінки стисливості армованої основи дозволяє оцінити лише невелику її товщину. Для круглих штампів вказаних розмірів ця товща складає лише два їх діаметра. Стандартний штамп економічно і технічно недоцільно встановлювати в шурфах і свердловинах. У цьому відношенні доцільно використовувати при дослідження стисливості

ґрунтів на великих глибинах пресіометричні випробовування.

Вирішити проблему дослідження стисливості ґрунтів за усією проектною товщею можливо за допомогою пресіометричних випробовувань. Тобто метою даної роботи є розробка методики визначення стисливості основ пресіометричним методом. Головним питанням є визначення закономірностей деформування ґрунтів при дії зонда пресіометра і порівняння їх з даними для штампів випробовувань.

Для виконання поставленої мети було використано гідравлічний пресіометр конструкції Д-76 (рис.1).

При цьому виникає необхідність використання зонду пресіометра з достатніми розмірами стисливої товщі. Для штампів численними дослідженнями встановлено, що глибина стисливої товщі залежить від розмірів, співвідношення сторін прямокутного штампів, величини тиску на ґрунт [2,4,8-10]. Для пресіометричних випробовувань такі дані нам невідомі, їх необхідно встановлювати експериментально. Проведення таких експериментальних досліджень потребує виготовлення додаткового обладнання, достатньої кількості випробовувань у польових умовах. Слід також зважати на той факт, що розміри зонду з однієї сторони обмежуються розмірами свердловини, а з іншої – потужністю навантажувальної системи пресіометра. Вирішити поставлену задачу можливо шляхом проведення обчислювального експерименту з використанням одного з сучасних програмних комплексів, який використовує метод скінченних елементів.

Мета роботи полягає в оцінці напружено-деформованого стану (НДС) систем «Основа – зонд пресіометра» шляхом проведення обчислювального експерименту за допомогою ПК PLAXIS 3D Foundation. На підставі цих даних будуть

встановлені оптимальні параметри зонду, тобто такі, що забезпечують максимальну стисливу товщу при технічних можливостях пресіометра конструкції Д-76.

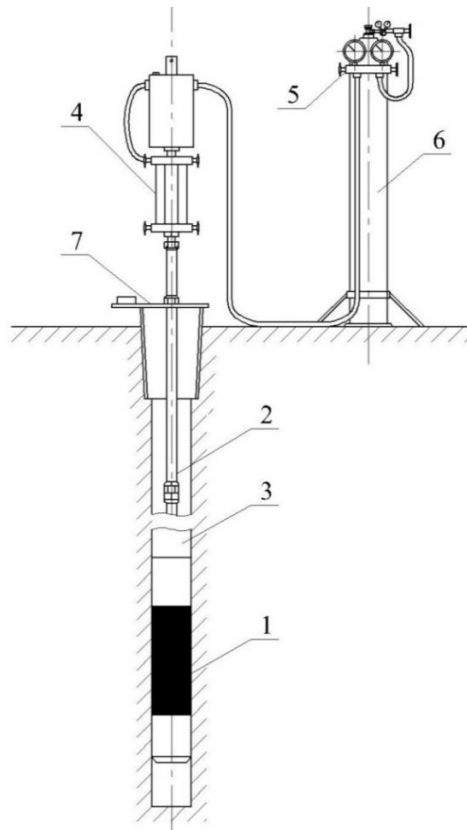


Рис. 1. Схема гідралічного пресіометра: 1 – зонд; 2 – жорсткий трубопровід; 3 – свердловина; 4 – водомірний вузол; 5 – манометр; 6 – балон зі стиснутим газом; 7 – фіксуюча вилка

Виклад основного матеріалу

Програмний інструментарій, який входить до складу ПК PLAXIS 3D Foundation, дозволяє виконувати геометричне й скінчено-елементне моделювання фізичних конструкцій, задавати початкові та остаточні граничні умови навантаження, які безпосередньо є крайовими задачами для їх подальшого розрахунку.

На вибір моделі вплинули вимоги використання фізичних рівнянь, які спираються на основні параметри механічних властивостей ґрунтів, що визначають за стандартними чи близькими до них методиками. У моделі використані відомі гіпотези механіки ґрунтів, зокрема:

1. Ґрунт у межах СЕ приймають за однорідне ізотропне середовище.
2. При деформаціях зберігається суцільність ґрунтового масиву.
3. Зміна значень фізико-механічних властивостей ґрунту за інших рівних умов є

функцією зміни його коефіцієнта пористості.

4. Як і в інших сучасних теоріях, деформації формозміни в загальному випадку нелінійні, тобто зв'язок між компонентами девіаторів напружень та деформацій нелінійний. Навантаження – просте (компоненти девіатора напружень зростають пропорційно одному параметру). Зберігається співвісність тензорів напружень і деформацій.

Розрахункова схема являє собою ідеалізовану модель об'єкту (рис.2). Вона автоматично розділяється на скінченні елементи. В результаті такого ділення з'являються вузли. Елементи та вузли нумеруються починаючи з нижніх та з початку системи координат.

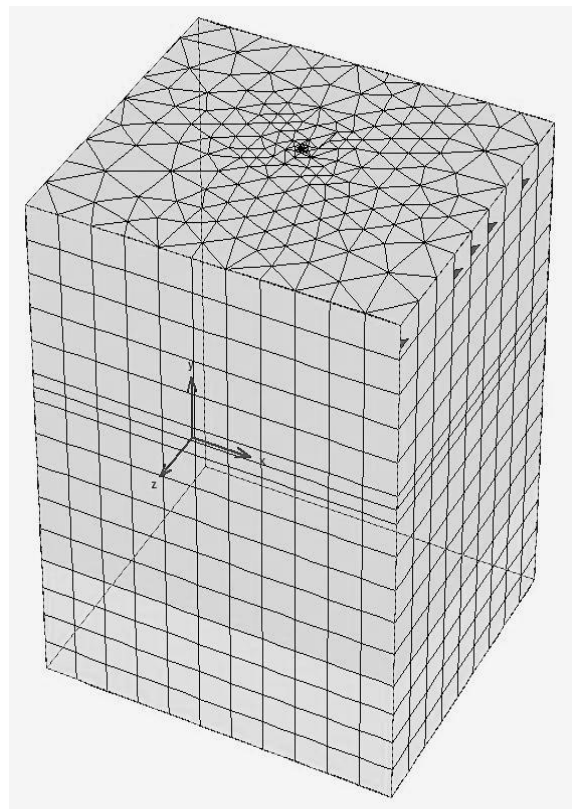


Рис. 2. Розрахункова схема системи «Основа – зонд пресіометра» загальний вигляд

Розміри розрахункової зони встановлені таким чином:

- бічні межі прямокутної розрахункової зони прийняті на достатній відстані від бічної поверхні стінки свердловини з урахуванням максимально очікуваної потужності стисливої товщі зонду з умови заборони горизонтальних переміщень, концентрації напружень і ущільнення ґрунту на контакті із зовнішньою межею розрахункової зони;
- верхню горизонтальну межу розрахункової зони розміщують на рівні поверхні Землі (котловану);
- за глибину розрахункової зони прийнято нижню межу стислої товщі основи.

Розрахункові області подано прямокутниками на площині. Границям області задано такі умови, які виключають будь-яке переміщення. За вертикальними границями встановлені лише горизонтальні опори, які дозволяють тільки вертикальне переміщення, верхня границя без в'язів. Навантаження приймалися розрахункові.

Вихідні дані для розрахунку приймалися за даними лабораторних досліджень відповідно до ГОСТ 5180-75, ДСТУ Б В.2.1-4-96 (ГОСТ 12248-96) та ДСТУ Б В.2.1-5-96 (ГОСТ 20522-96). Ці дані наведено в табл. 1.

На рис. 3 у вигляді тестової задачі наведені результати обчислювального експерименту пресіометричних випробовувань з метою

встановлення залежностей горизонтальної деформації ґрунту u , см у природній основі при постійному діаметрі і змінних висоти циліндричного зонду h , площі A , $см^2$ і тиску за його поверхнею σ , МПа.

Таблиця 1. Характеристики матеріалів для розрахунку в Plaxis 3D Foundation

Матеріал	Питома вага, γ , кН/м ³	Модуль деформації, E , МПа	Питоме зчеплення, c , кПа	Кут ϕ , град	Коеф. Пуассона, ν
Суглинок	17,8	7	5,7	22	0,3

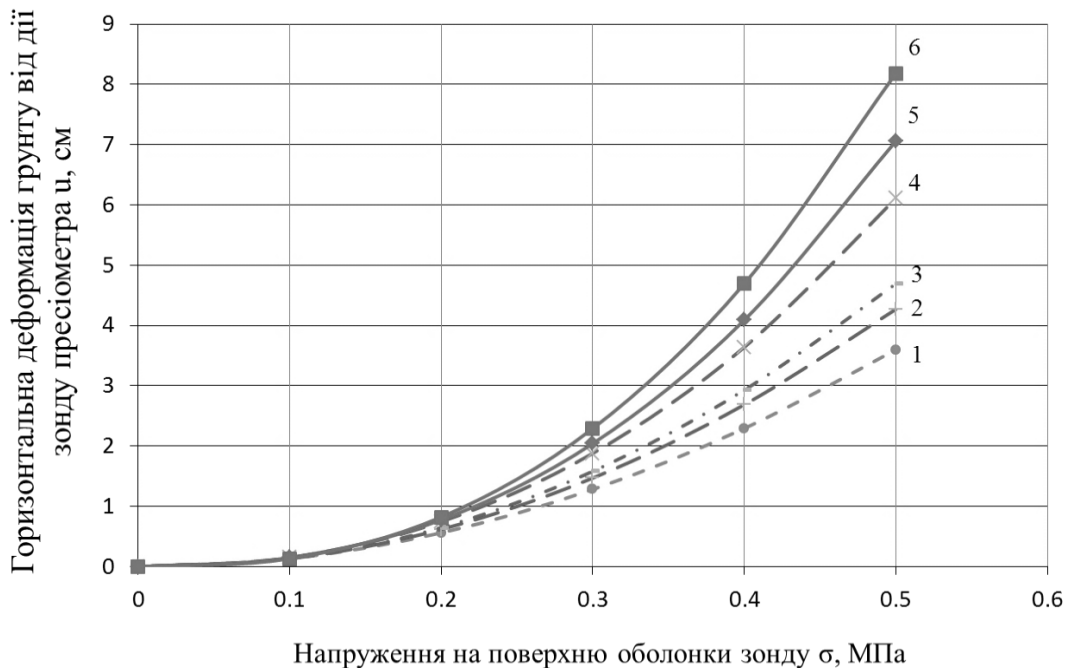


Рис. 3. Графік залежності «горизонтальна деформація ґрунту u , см – напруження на поверхні зонду σ , МПа» при постійному його діаметрі у 10.8 см (довжина кола $b = 33,9$ см) і значеннях висоти зонду h см: $h - 33,9$; 2 – 43,3; 3 – 49,3; 4 – 69,0; 5 – 86,2; 6 – 115 та відношення $k = h/b$: 1 – 1; 2 – 1,28; 3 – 1,45; 4 – 2,05; 5 – 2,54; 6 – 3,4

Рівняння за даними багатofакторного аналізу $u = 0.56 k + 13.47 \sigma - 2.9132$, см (1)

де u – горизонтальна деформація ґрунту при навантаженні стінок свердловини зондом пресіометра σ ; $k = h/b$, де h – висота зонда пресіометра; b – довжина кола зонда пресіометра.

При умові, що $k = h/b$ (змінюється від 1 – 3,33), де $b = 33,9$ см, а h змінюється від 33,9 – 115 см та σ від 0,1 – 0,5 МПа з одержаного рівняння видно, що із збільшенням тиску на ґрунт, σ , що входить до складу рівняння, збільшується горизонтальна деформація ґрунту, u , і навпаки. Теж саме можна сказати про величину коефіцієнта, k . Слід також відмітити, що чим більше величина коефіцієнта регресії, тим значніше вплив пояснюючої змінної на

залежну змінну. В даному випадку величина коефіцієнта регресії, x_2 при σ більше, ніж величина коефіцієнта, x_1 при k , отже, тиск обтиснення, що входить до складу рівняння (1), має значно більший вплив ніж співвідношення сторін площі зонду.

Коефіцієнт детермінації $R^2 = 0.87$; відповідно коефіцієнт кореляції $r = 0,93$, тобто встановлена залежність близька до функціональної.

Розрахункове значення коефіцієнта Фішера $F_p = 148,94$. Величина критичного значення $F_{крит}$ визначається за статистичними таблицями і для рівня значущості $\alpha = 0,05$ дорівнює $F_{крит} = 3,2$. Оскільки $F_p > F_{крит}$, то нульова гіпотеза відкидається, і одержане рівняння регресії

приймається статистично значущим. (Гіпотеза про адекватність моделі підтвердилася).

Оцінка статистичної значущості коефіцієнтів регресії x_1 і x_2 по t-критерію Стьюдента зводиться до зіставлення чисельного значення цих коефіцієнтів з величиною їх випадкових помилок m_{b1} і m_{b2} . В результаті розрахунку отримали, що $t_{кр} = 2,69$. Оскільки критичне значення t-статистики, визначене за статистичними таблицями для рівня значущості $\alpha = 0,05$ більше по абсолютній величині, ніж $t_k = 4,49$; $t_\sigma = 16,66$ і $t_0 = 8,41$ то нульова гіпотеза відкидається і рівняння регресії є статистично значущим.

Як свідчить рис.3, обчислювальним експериментом встановлені залежності горизонтальної деформації ґрунту від розміру пресіометричного зонду, співвідношення сторін його розвернутої поверхні і тиску на ґрунт. Отримане можливо сформулювати таким чином:

- при тиску на ґрунт до 0,1 МПа величина горизонтальної деформації ґрунту практично не

залежить ні від розмірів зонду, ні від співвідношення сторін його розвернутої поверхні; зі збільшенням тиску на ґрунт горизонтальна деформація ґрунту починає суттєво збільшуватися зі збільшенням розмірів зонду;

- вказане збільшення деформації ґрунту свідчить про формування стислої товщі ґрунту навкруги зонду пресіометра, глибина якої залежить від величини тиску на ґрунт, розмірів зонду і співвідношенні його сторін;

- встановлені закономірності відповідають загальним уявленням про деформування ґрунтів під квадратними і прямокутними жорсткими штампам [2,7].

На рис.4 наведені результати обчислювального експерименту, коли в аналогічних умовах зонд пресіометра має постійну висоту $h = 50$ см, а його діаметр змінюється у межах від 2,5-22 см.

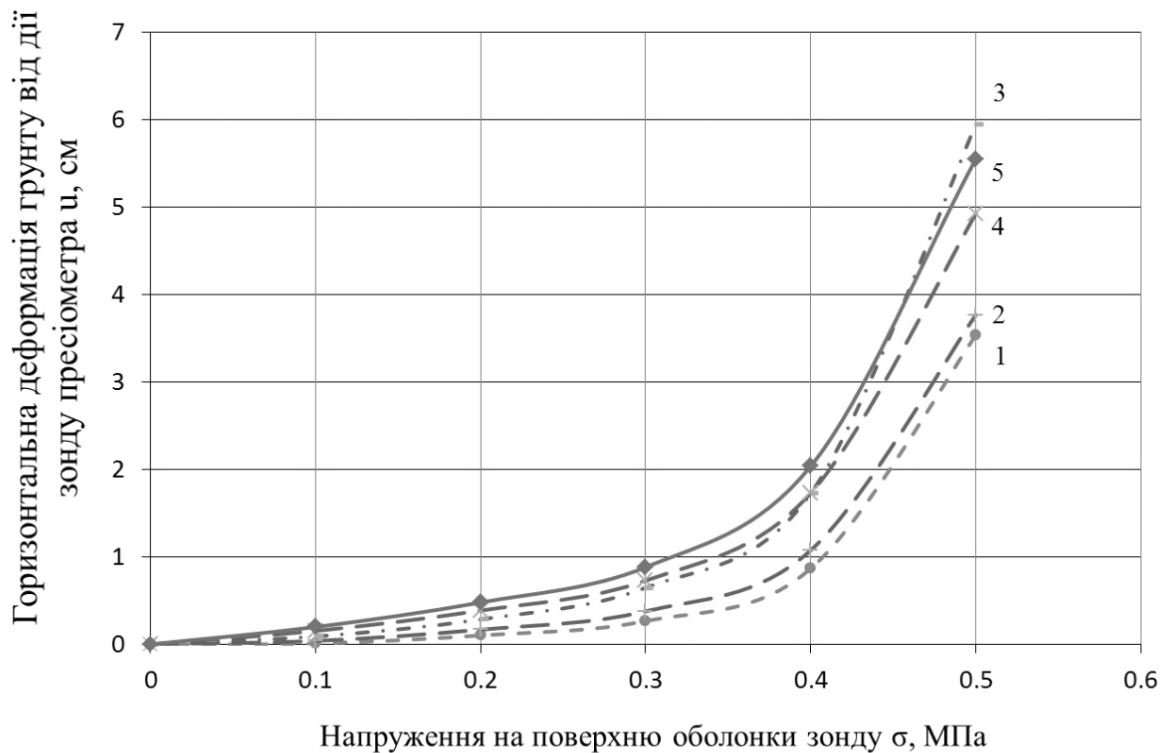


Рис. 4. Графік залежності «горизонтальна деформації ґрунту, u , см – напруження на поверхні зонду σ , МПа» при постійній його висоті $h = 50$ см і значеннях довжини кола зонду b , см: $b - 7,85$; $2 - 17,3$; $3 - 34,5$; $4 - 55$; $5 - 69$; відношення $r = h/b$: $1 - 6,4$; $2 - 2,9$; $3 - 1,45$; $4 - 0,91$; $5 - 0,72$

Рівняння багатофакторного аналізу
 $u = - 0,1994 k + 11,562 \sigma - 1,077$, см (2)

При умові, що $k = h/b$ (змінюється від 0,72 – 6,4), де b змінюється від 7.85 – 69.1 см, а $h = 50$ см та σ від 0,1 – 0,5 Мпа, дане рівняння характеризується такими ж ознаками, що і в поперемному випадку.

Коефіцієнт детермінації $R^2 = 0.903$; відповідно коефіцієнт кореляції $r = 0,95$, тобто встановлена залежність близька до функціональної.

Розрахункове значення коефіцієнту Фішера $F_p = 196,4$. Величина критичного значення $F_{крит}$ визначається по статистичних таблицях і для рівня значущості $\alpha = 0,05$ дорівнює $F_{крит} = 3,22$. Оскільки $F_p > F_{крит}$, то нульова гіпотеза відкидається, і одержане рівняння регресії приймається

статистично значущим. (Гіпотеза про адекватність моделі підтвердилася).

Оцінка статистичної значущості коефіцієнтів регресії x_1 і x_2 по t-критерію Стьюдента відповідно рівна $t_k = 5,33$; $t_\sigma = 19,08$ і $t_0 = 4,93$, при табличному значенні $t_{кр} = 2,70$ з чого робимо висновок, що нульова гіпотеза відкидається і рівняння регресії є статистично значущим.

Висновки

Співставлення графіків на рис. 3 і рис. 4 дає можливість зробити такі висновки:

- характер графіків на обох рисунках близький за окресленням – горизонтальна деформація основи збільшується зі збільшенням напружень і площі поверхні зонду;

- загальна горизонтальна деформація u , см при практично однаковій площині поверхні зонду і однаковому тиску за його поверхню, суттєво відрізняються – 8,2 см і 5,5 см;

- при напруженні в 0,1 МПа на рис.3 розміри і співвідношення сторін поверхні зонду не впливають на величину горизонтальної деформації, а на рис.4 маємо різницю у значеннях; теж саме можна відмітити при тиску в 0,2 МПа; вже при напруженні у 0,3 МПа на рис. 3 починає проявлятися фактор впливу площі і співвідношення сторін поверхні зонду і при збільшенні цього фактору різниця прогресує; в той час на рис.4 вплив цього фактору практично стабілізується;

- коли вважати, що площа зонду на обох графіках зростає однаково, то співвідношення сторін поверхні зонду на рис. 3 зростає, а на рис.4 – зменшується; саме цей фактор збільшує величину горизонтальної деформації ґрунту u , см тому, що зі збільшення співвідношення сторін поверхні штампів при рівній її площині суттєво збільшується потужність стисливої товщі – від 1 при квадратній поверхні до 6 і більше для стрічки.

Проведені обчислювальні експерименти підтвердили, що для пресіометричних випробувань при стисненні ґрунту в горизонтальному напрямку діють ті ж закономірності, що і для штампів при вертикальному навантаженні.

Література

1. ДСТУ Б В.2.1.-7-2000 (ГОСТ 20276-99) Ґрунти. Польові випробування.
2. Цытович Н.А. Механіка ґрунтів / Н.А. Цытович// Стройиздат.: М. – 1963. – 635с.
3. Бондарик Г.К. Методические рекомендации по определению деформационных и прочностных свойств глинистых пород методом прессиометрии / Г.К. Бондарик, С.Л. Коренева, Д.С. Горячева. – М.: ВСЕГИНГЕО, 1971. – 96 с.

4. Швец В.Б. Определение строительных свойств грунтов / В.Б. Швец, В.В. Лушников, Н.С. Швец. – К.: Будивельник, 1981. – 104 с.

5. Методические рекомендации по определению деформационных и прочностных свойств глинистых пород методом прессиометрии. – ссылка: <http://norm-load.ru/SNiP/Data1/41/41654/>.

6. Инструкция по эксплуатации прессиометрического комплекса Д-76 / Пригожин Е.С.// Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт «Гидропроект» имени С.Я. Жука. – М.: 1973. – С. 15-23.

7. Винников Ю.Л. Исследования анизотропии лессовидных грунтов вокруг фундаментов в пробитых скважинах / Винников Ю.Л. // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 1999. – № 4. – С. 123-128

8. Bahar R., Alimrina N., Belhassani O. (2013). Interpretation of a pressuremeter test in cohesive soils. International Conference on Geotechnical Engineering. – Hammamet, Tunisia. – P. 10.

9. Лавров С.Н. Опыт применения метода-контролируемых перемещений для полевых исследований грунтов / С.Н. Лавров, В.П. Писаненко, Л.В. Нухдин // Тр. Каспийской Междунар. конф. по геоэкологии и геотехнике. – Баку, 2003. – С. 158-167.

10. Текучев Ю.Б. О полевых испытаниях грунтов штампом малой площади / Ю.Б. Текучев, Е.П. Канашинская // Инженерные изыскания. – 2010. – №8 – С. 24-25.

References

1. DSTU B. V.2.1.-7-2000 (GOST 20276-99) (2001). Soils. Field methods for determining the strength and strain characteristics. Kiev. – P. 81.
2. Tsytovykh N.A. (1963). Soil mechanics. Stroyizdat. Moscow. – P. 635.
3. Bondarik G.K., Korenev S.L., Goryachev D.S. (1971). Methodical instructions on determination of deformation and strength properties of clay soils by pressuremeter. Russian Research Institute of Hydrogeology and Engineering Geology (VSEGINGEO). Moscow. – P. 96.
4. Shvets V.B., Lushnikov V.V., Shvets N.S. (1981). Defining construction properties of soils. Budivelnik. Kiev. – P. 104.
5. Methodical instructions (2009). In Technical specifications. Retrieved from <http://norm-load.ru/SNiP/Data1/41/41654/>
6. Prigogine E.S. (1973). Instructions pressuremeter of the D-76. Russian for Design and Survey and Scientific Research Institute of "Hydroproject" named Zhuka S.Y. Moscow. – pp. 15-23.
7. Vinnikov Y.L. (1999). Research anisotropy loess soils around the bases in the punched boreholes. Journal «Izvestiya vuzov. Stroyitelstvo.», 4, 123-128.
8. Bahar R., Alimrina N., Belhassani O. (2013). Interpretation of a pressuremeter test in cohesive soils. International Conference on Geotechnical Engineering. – Hammamet, Tunisia. – P. 10.
9. Lavrov S.N., Pisanenko V.P., Nuzhdin L.V. (2003). Experience with metoda- controlled movements field testing of soils. Third Caspian International Conference on Geology and Geotechnics. Baku. – pp. 158-167.
10. Tekuchev Y.B., Kanashinskaya E.P. (2010). On the field tests of soils small area stamp. Journal of Engineering surveys, 8, 24-25.

Автор: ЗОЦЕНКО Микола Леонідович
Полтавський національний технічний університет
імені Юрія Кондратюка «ПНТУ», Полтава, доктор
технічних наук, професор.
E-mail – zotcenco@mail.ru

Автор: ІВАНЧЕНКО Володимир Григорович
Полтавський національний технічний університет
імені Юрія Кондратюка «ПНТУ», Полтава, аспірант.
E-mail – zaw78@mail.ru

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ГРУНТА ПРИ ПРЕССИОМЕТРИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ

Н.Л. Зоценко, В.Г. Иванченко

В работе приведенные результаты вычислительного эксперимента pressiометрических испытаний лёссового суглинка. В процессе эксперимента изменяли давление на грунт, площадь и соотношение сторон зонда гидравлического pressiометра. С помощью статистических методов установлены соответствующие зависимости, которые влияют на деформации грунта. Проведенные вычислительные эксперименты подтвердили, что для pressiометрических испытаний при сжатии грунта в горизонтальном направлении действуют те же закономерности, что и для штампов при вертикальной нагрузке.

Ключевые слова: вычислительный эксперимент, штамп, pressiометр, pressiометрический зонд, деформации, параметры зонда.

CALCULATION STUDY OF THE SOIL DEFORMATION DURING THE PRESSIOMETRIC TESTS

N.L. Zotcenko, V.G. Ivanchenko

The main goals of this work are to study model pressuremeter test. The paper highlights the results of the calculation study of the pressiometric tests in the loess clay loam. The model of the mechanical behaviour of the soil is investigated by the finite element method. Numerical simulations of the pressuremeter tests are performed with Plaxis3D Foundation software. In the process of experiment the pressure, area and probe side ratio values of hydraulic pressiometer were periodically changed. Using the statistical methods the related dependencies affecting the soil deformation have been determined. The calculation experiments conducted have proved that for the pressiometric tests during soil compression the same rules are applied laterally as for the stamps with vertical loads.

Keywords: calculating experiment, stamp, pressiometer, pressiometer probe, deformations, probe parameters.