

**Мета роботи** – створити метод оцінки стисливості ґрунтової основи, яку закріплено ґрунтоцементними елементами, виготовленими за бурозмішувальним методом, за всієї її глибиною. Встановлені залежності горизонтальної деформації ґрунту від тиску, розмірів і співвідношення сторін зонду пресіометра в закріпленій основі. Встановлено залежність для визначення модуля деформації армованих основ за даними пресіометричних випробувань

**Ключові слова:** ґрунтова основа, бурозмішувальний метод, ґрунтоцемент, пружно-пластична задача механіки ґрунтів

**Цель работы** – создать метод оценки сжимаемости ґрунтовой основы, которая закреплена ґрунтоцементными элементами, изготовленными буросмесительным методом, по всей её глубине. Установлены зависимости горизонтальной деформации ґрунтов от давления, размеров и соотношения сторон зонда прессиометра в закреплённой основе. Установлена зависимость для определения модуля деформации армированных основ по данным прессиометрических испытаний

**Ключевые слова:** ґрунтовая основа, буросмесительный метод, ґрунтоцемент, упруго-пластичная задача механики ґрунта

УДК 624.131.38

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.50960

# АНАЛІЗ ПРЕСІОМЕТРИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ СТИСЛИВОСТІ ОСНОВ, ЗАКРІПЛЕНИХ ґРУНТОЦЕМЕНТОМ ЗА БУРОЗМІШУВАЛЬНОЮ ТЕХНОЛОГІЄЮ

М. Л. Зоценко

Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри\*

E-mail: zotcenco@mail.ru

В. Г. Іванченко

Аспірант\*

\*Кафедра видобування нафти і газу та геотехніки

Полтавський національний

технічний університет ім. Ю. Кондратюка

пр. 1 Травня, 24, м. Полтава, Україна, 36601

E-mail: zaw78@mail.ru

## 1. Вступ

Державними будівельними нормами України [1] передбачено підсилення слабких основ шляхом армування їх жорсткими елементами, які пронизують ґрунт у вертикальному, похилому і горизонтальному напрямках для покращення механічних властивостей основи. Ефект підсилення основи досягається за рахунок взаємодії жорстких елементів з ґрунтом. В залежності від розмірів елементів і відстані між ними визначається якість підсилення. У польових умовах ця якість контролюється статичними випробуваннями основ штампами великих розмірів тільки з відмітки поверхні дна котловану. Використовуються квадратні залізобетонні штампи перерізом 120x120 см. Величина штампів визначається необхідністю включення у роботу елементів армування з навколишнім масивом ґрунту. Завантаження основи проводиться через розподільчу подушку з щебню чи ущільненого ґрунту товщиною 500 мм [2, 3].

Актуальним є розробка методу, що адекватно дає змогу оцінити стисливість основи, яку підсилено армуючими ґрунтоцементними елементами, що виготовлений за бурозмішувальним методом, за усією її глибиною.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Аналіз низки досліджень вчених [4, 5] показує, що пресіометричний метод випробування застосовується

в глинястих ґрунтах в природньому стані, та при цьому використовується конструкція з малим діаметром зонду пресіометра. У роботах [6] розглянуто пресіометричні дослідження у твердому ґрунті без підсилення. У роботах [7] розглянуто аналогічні випробування тільки у прибереговій зоні (піщаний ґрунт).

Для перевірки якості армованих ґрунтів частіше застосовують метод статичного вдавлювання штампа [2]. Стандартний штамп економічно і технічно недоцільно встановлювати в шурфах і свердловинах [3]. Використання штампів великих розмірів для оцінювання стисливості армованої основи дозволяє оцінити лише невелику її товщину. Для квадратних штампів вказаних розмірів ця товща складає лише два їх діаметра, тобто 2,0–2,5 м [8]. Для південних районів України товща просадочних ґрунтів складає 25 м і навіть більше. Великий штамп недоцільно встановлювати на такій глибині. Тому необхідно використовувати інші методи визначення стисливості армованих основ.

При цьому виникає необхідність використання зонду пресіометра з достатніми розмірами стисливої товщі [9, 10]. Для штампів численними дослідженнями встановлено, що глибина стисливої товщі залежить від розмірів, співвідношення сторін прямокутного штампу, величини тиску на ґрунт [8]. Причому в цих публікаціях [4–7] питання випробувань у армованих основ ґрунтоцементними елементами за бурозмішувального не розглядалося. Для пресіометричних досліджень необхідно встановлю-

вати експериментально залежність параметрів зонду на модуль деформації армованої основи.

### 3. Ціль та задачі дослідження

Мета роботи полягає в оцінці напружено-деформованого стану (НДС) системи «Основа – зонд пресіометра – ґрунтоцементні елементи» шляхом проведення обчислювального експерименту за допомогою ПК PLAXIS 3D Foundation.

Для досягнення поставленої мети треба виконати такі задачі:

- провести моделювання експерименту пресіометричного дослідження у природньому стані ґрунту;
- встановлені оптимальні параметри зонду, тобто такі, що забезпечують максимальну стисливу товщю при технічних можливостях пресіометра конструкції Д-76 [11] в армованому масиві (рис. 1, а, б);
- порівняти результати обчислювального експерименту з проведеними на будівельному майданчику.

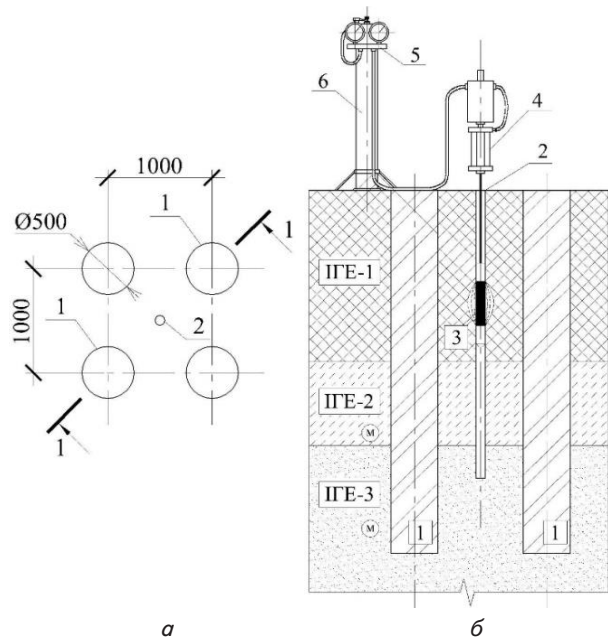


Рис. 1. Схема влаштування зонда пресіометра в армованому масиві: а – план розташування свердловини; б – розріз по 1-1: 1 – ґрунтоцементні елементи; 2 – пресіометрична свердловина; 3 – зонд пресіометра; 4 – водомірний вузол; 5 – манометри; 6 – балон зі стиснутим газом (азот)

У геотехнічній практиці для оцінювання механічних властивостей ґрунтів у польових умовах використовують методи статичного та динамічного зондування та випробовування пресіометрами різних конструкцій. Всі ці методи можна використовувати для оцінювання стисливості армованих ґрунтів, коли користуються принципом, що при наявності горизонтальної складової напружень, яка створюється в процесі випробовувань (при зондуванні це розпір при зануренні конуса, а при пресіометрії, взагалі, маємо справу лише з горизонтальними напруженнями), тобто зонд відчуває перепону, яка знаходиться у межах горизонтально орієнтованій стисливій товщі. При цьому опір стисненню ґрунту збільшується. Модуль дефор-

мації такої основи буде вищим, ніж подібної, але без перепони. У даному випадку такою перепонною слугують ґрунтоцементні елементи армування основи (рис. 1).

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, якій використовує метод скінченних елементів.

### 4. Матеріали та методи дослідження НДС системи «ґрунтова основа – зонд пресіометра – жорсткі ґрунтоцементні елементи»

Програмний інструментарій, який входить до складу ПК PLAXIS 3D Foundation, дозволяє виконувати геометричне й нескінченно-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 девіатора напружень і 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 і спочатку системи координат.

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 контакт 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 підсиленої основи.

Вихідні дані для розрахунку приймалися за даними лабораторних досліджень відповідно до ДСТУ Б В.2.1-4-96 (ГОСТ 12248-96) та ДСТУ Б В.2.1-5-96 (ГОСТ 20522-96). Призмову міцність  $\sigma_{пр}$  і модуль деформації  $E$  ґрунтоце-

менту визначали за результатами випробовувань зразків на одноосьове стиснення. Ці дані наведено в табл. 1.

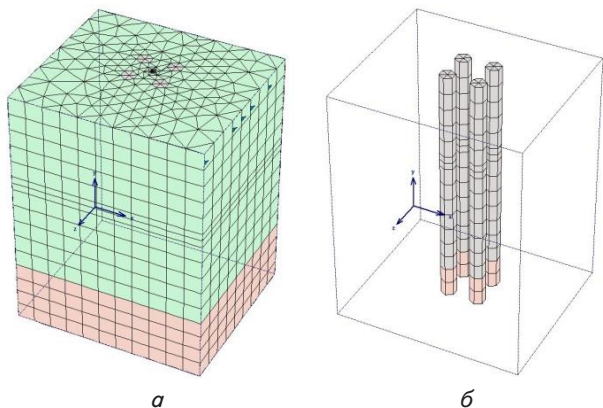


Рис. 2. Розрахункова схема системи «основа – зонд пресіометра – ґрунтоцементні елементи»: а – загальний вигляд; б – положення ГЦЕ

Таблиця 1

Характеристики матеріалів для розрахунку в Plaxis 3D Foundation

Матеріал	Питома вага $\gamma$ , кН/м <sup>3</sup>	Модуль деформації E, МПа	Питоме зчеплення c, кПа	Кут внутрішнього тертя $\phi$ , град	Коеф. Пуассона $\nu$
Суглинок	17,8	7	5,7	22	0,3
Ґрунто-цемент	18,2	80	100	22	0,2

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 з розрахунку несучої здатності основи.

### 5. Результати досліджень залежності деформацій ґрунту від зміни параметрів зонду пресіометра

На рис. 3 у вигляді тестової задачі наведені результати обчислювального експерименту пресіометричних випробовувань для встановлення залежностей горизонтальної деформації ґрунту  $u$ , см, у природній основі (до її армування ГЦЕ) при постійному діаметрі 10.8 см, і змінній висоті циліндричного зонду  $h$ , см, відповідно, площі  $A$ , см<sup>2</sup>, і тиску за його поверхнею  $\sigma$ , МПа. В результаті рівняння двохфакторного аналізу залежності деформацій  $u$ , см, від напружень при співвідношенні  $k$  має вигляд

$$u = 0.56395 k + 13.4658\sigma - 2.9132 \text{ см}, \quad (1)$$

де  $u$  – горизонтальна деформація ґрунту внаслідок тиску за поверхнею зонду пресіометра, см;  $b=33,9$  см – довжина кола зонду пресіометра;  $h$  – висота зонду пресіометра, змінюється у межах 33,9–115 см;  $k=h/b$  – співвідношення сторін розвернутої поверхні зонду пресіометра, змінюється у межах 1–3,33;  $\sigma$  – тиск на ґрунт за поверхнею зонду пресіометра, змінюється у межах 0–0,5 МПа.

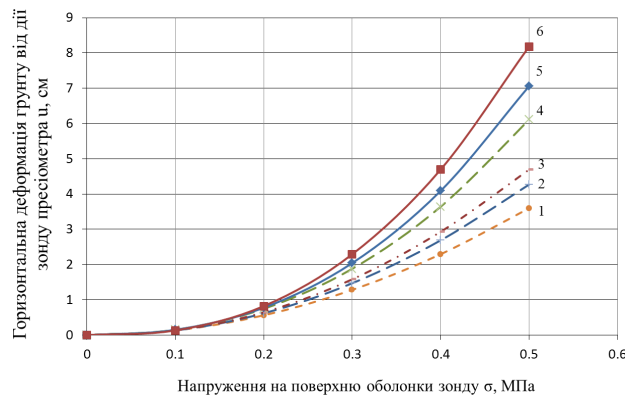


Рис. 3. Графіки залежності деформацій не підсиленого ґрунту від напружень при співвідношенні  $k=h/b$ , де  $b=33,9$  см, а  $h$  висота зонду пресіометра змінна: 1 – 1; 2 – 1,25; 3 – 1,43; 4 – 2; 5 – 2,5; 6 – 3,33

Зрівняння (1) видно, що збільшенням тиску на ґрунт,  $\sigma$ , 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 змінних на загальне рівняння. В даному випадку величина коефіцієнта регресії,  $x_2$  при  $\sigma$  більше, ніж величина коефіцієнта,  $x_1$  при  $k$ , отже тиск обчислення, що входить до складу рівняння (1), має значно більший вплив ніж співвідношення сторін площі зонду.

Коефіцієнт детермінації з рівняння (1)  $R^2=0,87$ ; відповідно коефіцієнт кореляції  $r=0,93$ , тобто встановлена залежність близька до функціональної.

Розрахункове значення критерія 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  $t_p=2,69$ . 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 відношення розмірів пресіометричного зонду, тобто співвідношення сторін його розвернутої поверхні й тиску на ґрунт. 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 стисливої товщі ґрунту навкруги зонду пресіометра, глибина якої залежить від величини тиску на ґрунт, розмірів зонду і співвідношення його сторін; тобто, при постійному значенню тиску,  $\sigma$ , найбільша

стисла товща ґрунту у зонда з відношенням сторін його поверхні  $k=3,33$ ; це положення підтверджується найбільшим значенням горизонтальної деформації  $u=8,15$  см, у той час у зонда з квадратною поверхнею  $u=3,6$  см; звичайно, на величину горизонтальної деформації накладається ще і збільшення площі поверхні зонду;

– встановлені закономірності відповідають загальним уявленням про деформування ґрунтів під квадратними і прямокутними жорсткими штампами [6];

– при всіх інших рівних умовах геології, щоб підвищити чутливість зонду пресіометра, необхідно збільшувати співвідношення його сторін  $k$ ; саме такі зонди необхідно використовувати при оцінюванні стисливості основ, армованих вертикальними жорсткими елементами.

Нижче наведені результати обчислювального експерименту для армованих основ з різним шагом розташування ґрунтоцементних елементів (ГЦЕ) у основі. Для проведення розрахунків використані дані, наведені у табл. 1.

На рис. 4 у наведені результати обчислювального експерименту пресіометричних випробовувань з метою встановлення залежностей горизонтальної деформації ґрунту  $u$ , см, у армований ГЦЕ основі за схемою, наведеною на рис. 1. Діаметр ГЦЕ 50 см, а відстань між їх осями 80 см. Розміри зондів і співвідношення їх сторін як у тестового експеримента.

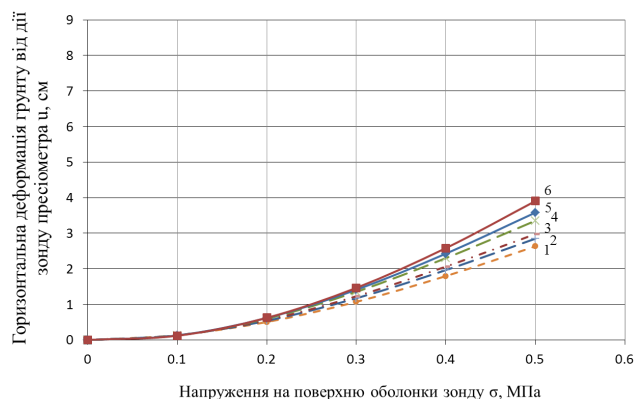


Рис. 4. Графіки залежності деформацій підсиленої ґрунтоцементними елементами ( $d=50$  см з кроком  $l=80$  см) основи від напружень при співвідношенні  $k=h/l$ : 1 – 1; 2 – 1,25; 3 – 1,43; 4 – 2; 5 – 2,5; 6 – 3,33

Рівняння двохфакторного аналізу залежності деформацій  $u$ , см, від напружень при співвідношенні  $k$ :

$$u=0.179k+7.75\sigma-1.232 \text{ см}, \quad (2)$$

де  $u$  – горизонтальна деформація ґрунту внаслідок тиску за поверхнею зонду пресіометра, см;  $b=33,9$  см – довжина кола зонду пресіометра;  $h$  – висота зонду пресіометра, змінюється у межах 33,9–115 см;  $k=h/b$  – співвідношення сторін розвернутої поверхні зонду пресіометра, змінюється у межах 1–3,33;  $\sigma$  – тиск на ґрунт за поверхнею зонду пресіометра, змінюється у межах 0–0,5 МПа.

Коефіцієнт детермінації  $R^2=0.956$ ; коефіцієнт кореляції  $r=0.98$ , залежність близька до функціональної.

Розрахункове значення критерія Фішера  $F_p=493,21$ , для рівня значущості  $\alpha=0,05$  критичне значення  $F_{кр}(2;45)=3,2$  – тобто рівняння значиме.  $t$ -критерій Ст'юдента:  $t_k=4,608$ ;  $t_\sigma=31,07$ ;  $t_p=11,53$  при  $t_{кр}(0,01;45)=2,69$  – коефіцієнти значимі.

На рис. 5, 6 наведені аналогічні залежності для армованої основи ГЦЕ діаметром 50 см при відстані між осями елементів 100 см і 150 см.

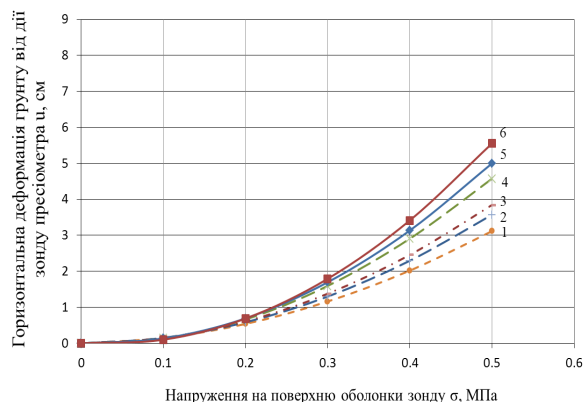


Рис. 5. Графіки залежності деформацій підсиленої ґрунтоцементними елементами ( $d=50$  см з кроком  $l=100$  см) основи від напружень при співвідношенні  $k=h/l$ : 1 – 1; 2 – 1,25; 3 – 1,43; 4 – 2; 5 – 2,5; 6 – 3,33

Рівняння двохфакторного аналізу залежності деформацій  $u$ , см, від зміни відстані між осями елементів 100 см:

$$u=0.31343k+10.2146\sigma-1.8947 \text{ см}. \quad (3)$$

Коефіцієнт детермінації  $R^2=0.91609$ , коефіцієнт кореляції  $r=0,96$ , залежність близька до функціональної. Розрахункове значення критерія Фішера  $F_p=245.65$ ,  $\alpha=0,05$ , звідки критичне значення  $F_{кр}(2;45)=3,2$  – рівняння значиме.  $t$ -критерій Ст'юдента:  $t_k=4,3$ ;  $t_\sigma=21,75$ ;  $t_p=9,41$  при  $t_{кр}(0,01;45)=2,69$  – коефіцієнти значимі.

Рівняння двохфакторного аналізу залежності деформацій  $u$ , від зміни відстані між осями ГЦЕ 150 см:

$$u=0.51k+12.7\sigma-2.67 \text{ см}. \quad (4)$$

Коефіцієнт детермінації  $R^2=0.88$ , коефіцієнт кореляції  $r=0,94$ , залежність близька до функціональної. Розрахункове значення критерія Фішера  $F_p=161.5$ ,  $\alpha=0,05$  звідки критичне значення  $F_{кр}(2;45)=3,2$  – рівняння значиме.  $t$ -критерій Ст'юдента:  $t_k=4,45$ ;  $t_\sigma=17,41$ ;  $t_p=8,55$  при  $t_{кр}(0,01;45)=2,69$  – коефіцієнти значимі.

За даними проведеного обчислювального експерименту складено табл. 2, у якій проведемо обчислення значень модуля деформації,  $E$ , за рівнянням, складеним на основі формули Шлейхера:

$$E=(1+\mu)\lambda b \frac{\sigma}{u}, \quad (5)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона;  $\lambda$  – масштабний коефіцієнт, який враховує особливості пресіометричних випробовувань  $b$  – довжина кола зонду пресіометра, см;  $\sigma$  – тиск на ґрунт за поверхнею зонда пресіометра;  $u$  – горизонтальна деформація ґрунту.

У табл. 1 значення пресіометричного модуля деформації обчислені для співвідношення  $k=h/b=1,43$ , що близько до параметрів зонду пресіометра Д-76. У табл. 2 наведені значення модуля деформації  $E$ , розраховані за рівнянням (5) і за рекомендаціями ДБН [1].



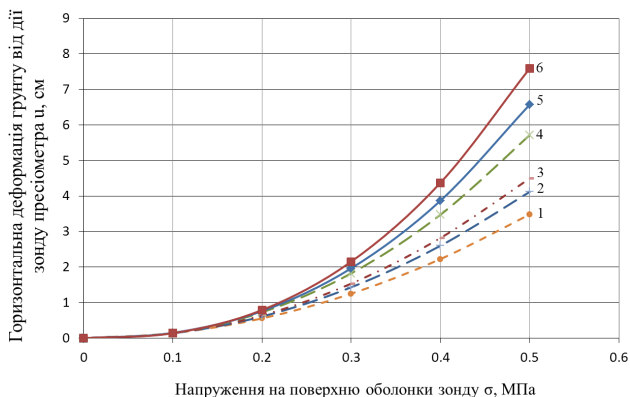


Рис. 6. Графіки залежності деформацій підсиленої ґрунтоцементними елементами (d=50 см з кроком l=150 см) основи від напружень при співвідношенні k=h/b: 1 – 1; 2 – 1,25; 3 – 1,43; 4 – 2; 5 – 2,5; 6 – 3,33

За даними табл. 2 побудований рис. 7, на якому графічно співставленні відповідні значення модуля деформації.

Таблиця 2

Співставлення значень модулів деформації, отриманих за пресіометрією і розрахунком за ДБН [1]

Крок ГЦЕ l, см	Модуль деформації за пресіометрією E <sub>п</sub> за рівнянням (5) при тиску зонду пресіометра на ґрунт σ, МПа						Модуль деформації E <sub>p</sub> за ДБН
	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	
–	6.8	4.85	3.8	3.2	2.8	2.6	7
150	6.7	4.9	3.9	3.3	2.9	2.7	13.37
100	6.8	5.2	4.2	3.6	3.2	3,0	21.33
80	7.4	5.6	4.6	4.0	3.7	3.4	29.43

Рівняння двохфакторного аналізу із результатом співвідношення (λ=E<sub>p</sub>/E<sub>п</sub>) на 24 значення:

$$\lambda = 13,48\sigma - 0,0038l + 1,934, \tag{6}$$

при умові, що E<sub>п</sub> змінюється від 1.029 – 8,608 МПа, σ від 0,2–0,4 МПа та l від 80–150 см; коефіцієнт детермінації R<sup>2</sup>=0,76, кореляції r=0,874; критерій Фішера F<sub>p</sub>=34,03, α=0,05 звідки F<sub>кр</sub>(2;21)=3,47 – рівняння значиме; t-критерій Стьюдента: t<sub>σ</sub>=5,09; t<sub>l</sub>=6,5; t<sub>0</sub>=2,46 при t<sub>кр</sub>(0,05;21)=2,08 – коефіцієнти значимі.

У табл. 3 наведені значення масштабного коефіцієнту, m, у розглянутих діапазонах параметрів рівняння (6).

Таблиця 3

Значення масштабного, λ, коефіцієнта в залежності від відстані між ГЦЕ

Крок ГЦЕ l, см	Масштабний коефіцієнт λ в залежності від тиску на ґрунт σ, МПа					
	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
–	1.029	1.443	1.828	2.173	2.473	2.727
150	1.988	2.730	3.421	4.044	4.588	5.053
100	3.158	4.142	5.046	5.863	6.585	7.211
80	3.959	5.257	6.377	7.303	8.041	8.608

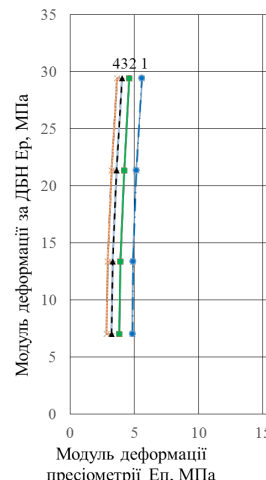


Рис. 7. Графік залежності між розрахунковими модулями деформації підсиленого ґрунту, де 1 – 0,2; 2 – 0,25; 3 – 0,3; 4 – 0,35 напруження в МПа

### 6. Обговорення результатів дослідження із застосуванням викладеного методу на дослідних майданчиках

Порівняння значень модуля деформації E<sub>п</sub>, визначеного за паралельними пресіометричними випробуваннями і штампами, які були проведені на трьох дослідних майданчиках, де були виконані роботи з підсилення ґрунту шляхом армування вертикальними ГЦЕ діаметром 500 мм кроком 100 см.

Дослідний майданчик № 1 – 10-ти поверховий житловий будинок у м. Полтава; Полтавське лесове плато; ґрунт – суглинок лесований, м'якопластичний.

Дослідний майданчик № 2 – елеватор у с. Велика Доч, Борзнянського району, Чернігівської області; у геоморфологічному відношенні майданчик віднесено до IV надзаплавної тераси р. Десна, ґрунт суглинок лесований, тугопластичний, високопористий, карбо-натний, просадочний.

Дослідний майданчик № 3 – додаткові технологічні тракти СМД-1 та СМД-2 на ВАТ Полтавський ГЗК в м. Комсомольськ; з геоморфологічної точки зору він знаходиться у межах другої (піщаної) тераси лівобережної долини р. Дніпро. Його приурочено до дюнної частини цієї долини. Сучасний рельєф майданчику носить техногенний характер. Ґрунт – насипний шар (пісок пухкий, мілкий, маловологий).

Штампові випробування проводилися жорстким залізобетонним квадратним штампом стороною 120 см у двократній повторності. Пресіометричні випробування проводилися пресіометром Д-76 шестикратній повторності. Коефіцієнт λ прийнятий за табл. 3 при тиску σ=0,3 МПа. У табл. 4 проведено порівняння отриманих результатів.

Як свідчать наведені дані, маємо задовільну збіжність значень модуля загальної деформації ґрунтів, закріплених армуванням ґрунтоцементом за бурозмішувальним методом, за трьома способами його визначення: штампами великого розміру з урахуванням масштабного коефіцієнту по М. О. Цитовичу [8, 12], за ДБН [1] і пресіометром, відповідно до способу, який пропонується.

Коли розглядати отримані дані з точки зору анізотропії ґрунтів, маємо для майданчика 1 при лесо-

ваному суглинку м'якопластичному, коефіцієнт анізотропії  $n=E_{\perp}/E_{\parallel}=1,15$ ; для майданчика 2 – лесований суглинок тугопластичний  $n=1,23$ ; для майданчика 3 при піску мілкому, насипному, ізотропному  $n=1$ . Ці дані корелюються з дослідженнями анізотропних лесованих суглинків [13–15].

Таблиця 4

Значення модуля деформації ґрунту за дослідними майданчиками

Дослідні майданчики	Модуль деформації за результатами випробовувань $E$ , МПа		
	штампом	Розрахунком за ДБН	Пресіометром за (4)
1	14	12,2	12,8 (0,13)*
2	19	16,4	15,5 (0,12)*
3	22	18,1	22,2 (0,18)*

Примітка: \* у дужках наведені значення коефіцієнта варіації,  $v$

## 7. Висновки

1. У сучасному будівництві набув широкого розповсюдження метод закріплення ґрунтів шляхом їх армування вертикальними ГЦЕ, які виготовляються за бурозмішувальним методом. Оцінюють стисливість таких основ випробуваннями квадратними штампами великих розмірів, які доцільно встановлювати лише з поверхні основи, при цьому можливо оцінити основу на глибину, яка дорівнює двом діаметрам штампу. В

Україні маємо досвід підсилення основ таким методом до глибини 27 м, у Світі таке підсилення ґрунтів проводиться на значно більші глибини. Оцінити стисливість таких основ можливо за допомогою пресіометричних випробовувань, які виконують у бурових свердловинах.

2. Проведені дослідження спрямовані на встановлення закономірностей деформування армованих ґрунтів під тиском, що створює зонд пресіометра. Методом досліджень використаний обчислювальний експеримент, який проведено за допомогою програмного комплексу PLAXIS 3D Foundation. Складено розрахункову схему і вихідні дані для розрахунків. Внаслідок проведених досліджень встановлено залежності горизонтальної деформації ґрунту від тиску, розмірів і співвідношення сторін зонду, наявності ґрунтоцементних елементів армування. На підставі цих даних встановлено, що ці залежності, ззагалі, відповідають аналогічним рівнянням для штампів, а кількісну різницю між ними можливо корегувати масштабним коефіцієнтом, який встановлений за результатами співставлення значень штампового і пресіометричного модулів деформації. Внаслідок встановлено формулу для визначення модуля деформації армованих основ за даними пресіометричних випробовувань.

3. На трьох дослідних майданчиках у глинистих і піщаних ґрунтах проведені паралельні штампіві і пресіометричні випробовування ґрунтів. Отримані дані порівняні між собою і з значеннями, які рекомендує ДБН [1]. Відмічено задовільну збіжність отриманих результатів. Деякі розходження у величинах модуля деформації віднесені до проявлені анізотропії лесових ґрунтів.

## Література

1. ДБН В.2.1-10-2009. Основи та фундаменти будівель і споруд. Основні положення проектування. Зміна № 1. Зміна № 2. [Текст]. – К.: Мінрегіобуд України, 2009 – 83 с.
2. Степура, И. В. Армирование лесовых грунтов оснований зданий и сооружений [Текст] / И. В. Степура, В. С. Шокарев, А. С. Трегуб, А. В. Павлов, В. П. Павленко // Международная конференция по проблемам механики грунтов, фундаментостроению и транспортному строительству. – Пермь, Россия, ПГТУ, 2004. – С. 213–219.
3. Текучев, Ю. Б. О полевых испытаниях грунтов штампом малой площади [Текст] / Ю. Б. Текучев, Е. П. Канашиная // Инженерные изыскания. – 2010. – № 8 – С. 24–25.
4. Bahar, R. Undrained strength of clays derived from pressuremeter tests [Text] / R. Bahar, F. Baidi, O. Belhassani, E. Vincens. // European Journal of Environmental and Civil Engineering. – 2012. – Vol. 16, Issue 10. – P. 1238–1260. doi: 10.1080/19648189.2012.701930
5. Fawaz, A. A Study of the Pressuremeter Modulus and Its Comparison to the Elastic Modulus of Soil [Text] / A. Fawaz, F. Hagechehade, E. Farah // Study of Civil Engineering and Architecture (SCEA). – 2014. – Vol. 3. – P. 7–15.
6. Fawaz, A. Parameters deduced from the pressuremeter test [Text] / A. Fawaz, M. Boulon, E. Flavigny // Canadian Geotechnical Journal. – 2002. – Vol. 39, Issue 6. – P. 1333–1340. doi: 10.1139/t02-099
7. Goh, K. Understanding the Stiffness of Soils in Singapore from Pressuremeter Testing [Text] / K. Goh, K. Jayatharan, D. Wen // Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA. – 2012. – Vol. 43, Issue 4. – P. 21–29.
8. Цытович, Н. А. Механика грунтов [Текст] / Н. А. Цытович. – М.: Стройиздат, 1983. – 635 с.
9. Messaoud, F. Pencil pressuremeter test evaluation for developing p-y curves for driven piles [Text] / F. Messaoud, M. Nouaouria, P. Cosentino // International Journal of Recent Trends in Engineering. – 2009. – Vol. 1, Issue 6. – P. 20–24.
10. Varaksin, S. Pressuremeter for design and acceptance of challenging ground improvement works [Text] / S. Varaksin, B. Hamidi // Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, 2013.
11. Бондарик, Г. К. Методические рекомендации по определению деформационных и прочностных свойств глинистых пород методом прессиометрии [Текст] / Г. К. Бондарик, С. Л. Коренева, Д. С. Горячева. – М.: ВСЕГИНГЕО. 1971. – 96 с.
12. Швец, В. Б. Определение строительных свойств грунтов [Текст] / В. Б. Швец, В. В. Лушников, Н. С. Швец. – К.: Будівельник, 1981. – 104 с.
13. Винников, Ю. Л. Исследования анизотропии лесовидных грунтов вокруг фундаментов в пробитых скважинах [Текст] / Ю. Л. Винников // Изв. вузов. Строительство. – 1999. – № 4. – С. 123–128.
14. Zotsenko, N. Anisotropic Soil Medium of Foundation Compaction Zone [Text] / N. Zotsenko, Yu. Vynnykov // Problemy Naukowo – Badawcze Budownictwa. T. VII. – XLIV Konferencja Naukowa Krynica '98. – Poznan – Krynica, 1998. – P. 193–201.
15. Лавров, С. Н. Опыт применения метода контролируемых перемещений для полевых исследований грунтов [Текст] / С. Н. Лавров, В. П. Писаненко, Л. В. Нуждин // Тр. Каспийской Междунар. конф. по геоэкологии и геотехнике. – Баку, 2003. – С. 158–167.