

УДК 624.131.35

**ПЕНЕТРАЦІЙНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ТУЖАВІННЯ  
ГРУНТОЦЕМЕНТУ**

*Д.т.н., проф. Зоценко М.Л., аспірант Ясько С.Г.  
Полтавський національний технічний університет  
імені Юрія Кондратюка*

**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. Останнім часом для закріплення ґрунтових масивів набуває широкого вжитку метод їх армування ґрунтоцементними елементами, які у сучасному будівництві виготовляються за двома основними технологіями: бурозмішувальною і струменевою. 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. Для цього 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.

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 ефективного врахування особливостей конкретних майданчиків, вихідних компонентів і достовірності методів, які використовуються для контролю якості. Отже, для вирішення вказаних питань необхідно мати експериментальні дані, які достовірно визначають характеристики міцності ґрунтоцементу протягом часу від моменту його виготовлення до часу набуття проектних параметрів.

**Зв'язок з науковими і практичними завданнями та аналіз останніх досліджень і публікацій.**

У практиці проектування для ґрунтоцементних елементів за основний показник якості прийнята міцність, що визначається величиною опору зразків одновісному стиску. Також відомі способи контролю якості ґрунтоцементу, що ґрунтуються на принципі подібності залежностей модуля деформації ґрунтоцементу і кількості гідратованого цементу в матеріалі від терміну його тужавіння. Вони полягають у порівнянні значень кількості хімічно зв'язаної води, або залишкової лужності [5], з попередньо визначеними значеннями, які встановлено на стандартних зразках ґрунтоцементу того ж віку твердіння, що і досліджувана проба.

Наведені методи потребують лабораторних досліджень, що не завжди зручно в умовах реального будівельного майданчика, тому поряд з цими методами бажано було використовувати швидкісні методи досліджень такі як

методи статичного зондування і penetрації. Позитивною особливістю цих методів є можливість майже одночасного дослідження як виготовленого ґрунтоцементного елемента, так і масиву ґрунту в якому він влаштований.

Розвитку швидкісних методів досліджень, до яких відносяться методи penetрації та зондування, сприяли роботи Ребіндера П.А., Цитовича М.А., Березанцева В.Г. Великий внесок у розвиток цих методів вніс Разорьонов В.Ф., у роботах якого детально розглянуто питання теорії та практики penetраційних випробувань.

Penetraцією 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 - це зветься зондуванням[3,4]. 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  $h < h_{\text{кон}}$ , графік залежності  $h=f(P)$  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

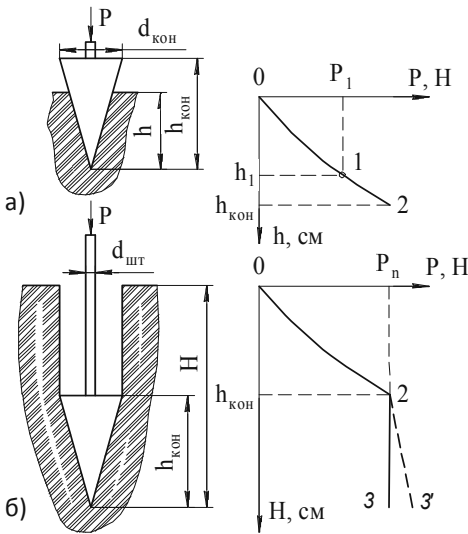


Рис. 1. Схем дослідження методами: а – penetрації та б – зондування

незмінною, тому подальше збільшення зусилля зондування в зв'язних однорідних ґрунтах приймається, тому графік залежності  $h=f(P)$  отримує різкий перелом. Замість параболічної залежності (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

$d_{кон} \gg d_{шт}$  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  $\theta$  цих прямих до вісі ординат:

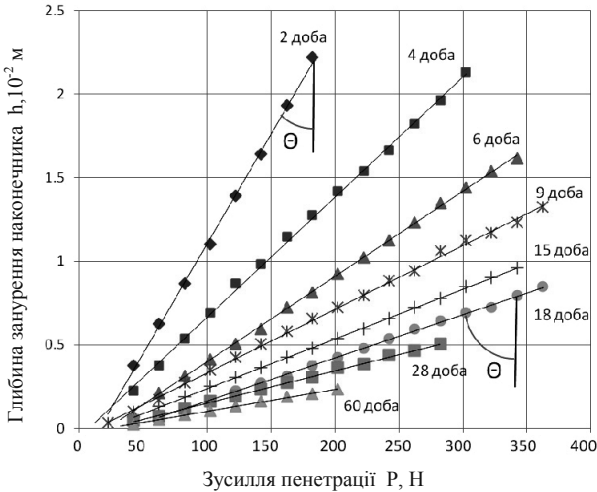


Рис.2. Графіки інваріантності питомого опору penetрації

$$R = \tan \theta = \frac{P}{h^2} \quad (1)$$

Питомий опір ґрунту під наконечником (конусом) зонда при статичному зондуванні  $q_s$  визначається як опір ґрунту наконечнику (конусу) зонда  $P$  віднесений до площі основи наконечника (конуса) зонда  $A$  [7]:

$$q_s = \frac{P}{A}, \quad (2)$$

Питомий опір ґрунту під наконечником зонда при статичному зондуванні розширеним наконечником  $q_{зр}$  визначається як опір ґрунту наконечнику зонда віднесений до квадрата висоти конуса  $h_{кон}$ :

$$q_{зр} = \frac{P}{h_{кон}^2}, \quad (3)$$

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

$$\sigma_{сж} = 0,12 + 0,1 \cdot q_{з}, \quad (4)$$

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 елемента; відсутність достовірної методики прогнозування зміни показників у часі в залежності від умов тужавіння.

Отже, виходячи з останніх досліджень і публікацій можна зазначити, що дослідження процесів зміцнення ґрунтоцементу протягом часу методами пенетрації і статичного зондування до цього часу не приділялось уваги.

**Формулювання цілей статті.** Оскільки вибурування зразків-кернах потребує значних фінансових та трудових витрат, тому при визначенні якості ґрунтоцементних елементів доцільніше, для зменшення обсягу бурових робіт, паралельно використовувати метод статичного зондування розширеним наконечником. Зондування розширеним наконечником виконується за діаметра основи конуса, що перевищує діаметр штанг в 1,6 і більше разів та кутом при вершині 30°. При такому співвідношенні окрім виключення або значного зниження торта по бічній поверхні штанг створюються умови до вільного випинання досліджуваного матеріалу в порожнину, яка утворюється між стінками свердловини і штангою, що значно знижує зусилля зондування [2,3,4]. Основною метою дослідження є вивчення процесів зміцнення ґрунтоцементу протягом часу в залежності від температури з використанням методів пенетрації і статичного зондування розширеним наконечником для подальшого використання при контролі якості виробництва ґрунтоцементних елементів.

**Виклад основного матеріалу.** Для дослідження залежності питомого опору пенетрації протягом часу залежно від температурних умов в якості вихідних матеріалів були обрані портландцемент ПЦ ІІ/Б-Ш-400 марки 400 і лесований суглинок з наступними характеристиками: вагова вологість  $W=0,18$ , число пластичності  $I_p=12,3$ , щільність  $\rho_d=1,53$  т/м<sup>3</sup>, щільність

скелету  $\rho = 1,3 \text{ т/м}^3$ . Грунт ретельно перемішувався з цементним молоком до отримання однорідної суміші з вмістом цементу 20% від ваги скелету. Значення водо-цементного відношення складало  $В/Ц=2,7$ , а рухливість розчину  $ОК=11 \text{ см}$ . Готовим розчином заповнювались циліндричні форми діаметром 100 мм. Після доби витримки форми розміщувались для зберігання в термостатичній камері у водонасиченому піску. Дослідження проводились терміном 70 діб від дати виготовлення зразків. Одночасно проводилось дослідження 4 груп зразків. Кожна з груп зразків ґрунтоцементу зберігалась відповідно при постійній температурі  $24^\circ\text{C}$ ,  $18^\circ\text{C}$ ,  $16^\circ\text{C}$ ,  $8^\circ\text{C}$ .

Для проведення вимірювань використовувався стандартний лабораторний penetrometer ЛП-1. Протягом від третьої до одинадятої доби penetраційні дослідження зразків проводилось разом із зондуванням. Графіки випробувань зразків ґрунтоцементу різного терміну тужавіння методами penetрації та зондування наведені на рис.3.

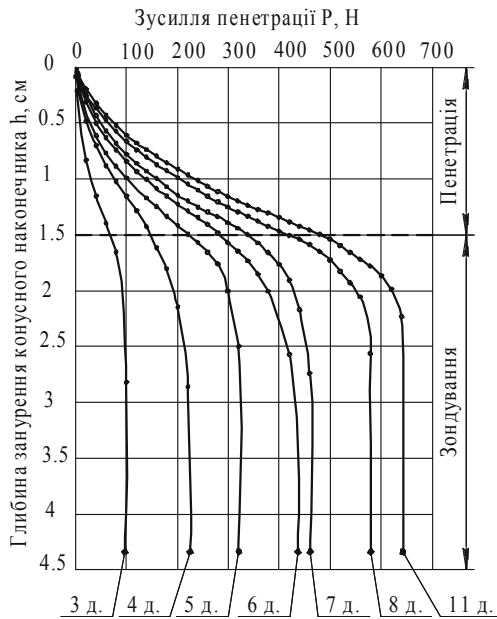


Рис. 3. Графіки випробувань зразків ґрунтоцементу різного терміну тужавіння методами penetрації та зондування

У якості наконечника використовувався конус висотою 15 мм з кутом при вершині  $30^\circ$ . Для перевірки інваріантності визначення питомого опору penetрації попередньо будувались криві залежності квадрата глибини занурення конічного наконечника від зусилля penetрації. Далі проводилась лінійна інтерполяція отриманих значень та їх коригування.

Проведений регресійний аналіз дозволив встановити залежність між питомими опорами penetрації та зондування, яка має лінійний характер (рис. 3):

$$q_{zp} = 0,001429 + 1,1458 \cdot R, \quad (5)$$

де  $q_{zp}$  – питомий опір зондуванню розширеним наконечником, МПа;  $R$  – питомий опір penetрації, МПа.

Регресійне рівняння має наступні характеристики: квадрат коефіцієнту кореляції  $r^2 = 0,9897$ ; рівень статистичної значущості отриманої залежності  $\sigma = 3 \cdot 10^{-8}$ .

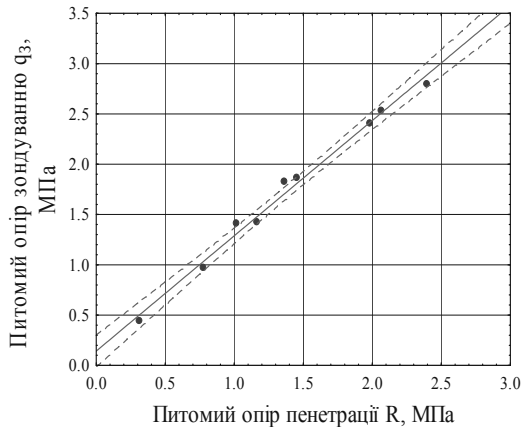


Рис.4. Графік регресійної залежності між  $q_z$  та  $R$

При контролі якості ґрунтоцементних елементів дослідження проводяться через деякий час після їх виготовлення і за певної температури тужавіння суміші. Тому важливо мати розрахункові залежності для отримання прогнозованих значень параметрів, що контролюються.

Враховуючи подібність залежностей питомого опору penetрації, модуля деформації ґрунтоцементу, кількості гідратованого цементу в матеріалі від терміну тужавіння була проведена апроксимація отриманих експериментальних даних функцією виду:

$$R = a_1 + b_1 \cdot t - b_2 \cdot e^{(-b_3 \cdot T)}, \quad (6)$$

де  $R$  – питомий опір penetрації МПа,  $a$  – вільний член,  $b_1$ - $b_3$  – регресійні оцінки,  $t$  – температура зберігання зразків, °С,  $T$  – термін тужавіння, днів.

При визначенні регресійних оцінок використовувалась комбінація методів Розенброка та квазі-ньютонівського. Застосування цих методів дало

наступні значення вільного члена та регресійних оцінок:  $a=0.03833$ ,  $b_1=0.945 \cdot 10^{-3}$ ,  $b_2=0.0537$ ,  $b_3=0.04373$ . [6]

Рівень значущості для вільного члена та всіх оцінок регресії менший за  $p=10^{-8}$ . Функція втрат визначалась за методом найменших квадратів. Пояснена частина дисперсії склала 0,9634, множинний коефіцієнт кореляції  $r = 0,98153$ , стандартне відхилення для значення питомого опору penetрації  $\sigma = 0,01424$  МПа.

Функція отриманої залежності має наступний вигляд:

$$R = 3,833 + 0.094 \cdot t - 5,37 \cdot e^{-0.0437 \cdot T} \quad (7)$$

Тривимірний графік апроксимуючої поверхні питомого опору penetрації залежно від віку та температури ґрунтоцементу показані на рис. 5.

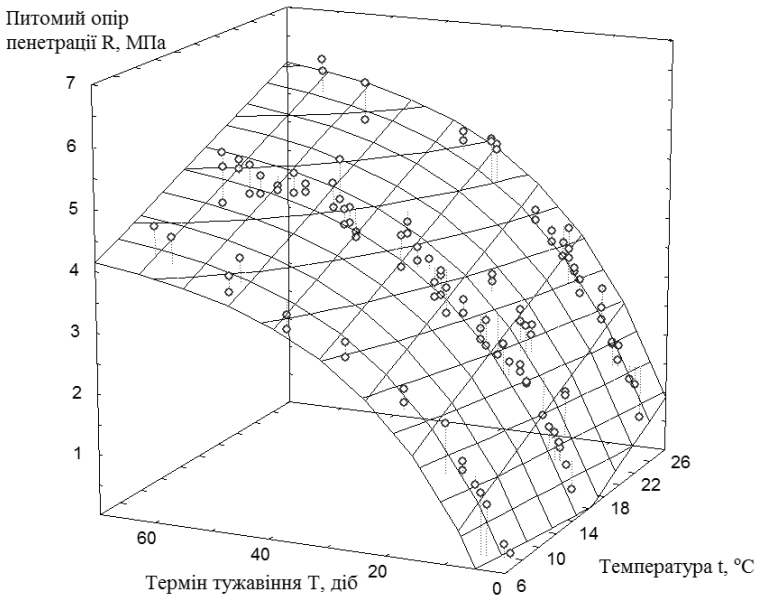


Рис. 5. Графік апроксимуючої поверхні питомого опору penetрації (R, МПа) залежно від віку зразків (T, діб) та температури ґрунтоцементу (t, °C), маркерними точками позначені значення отримані емпірично.

З врахуванням формули (5) запишемо формулу (6) у такому вигляді:

$$q_{зр} = 3,834 + 0,108 \cdot t - 6,153 \cdot e^{-0.04373 \cdot T} \quad (8)$$

або з врахуванням формули (4) та співвідношення:

$$q_{зр} = \frac{q_z}{\pi \cdot tg \frac{\alpha}{2}} = 1,19 \cdot q_z \quad (9)$$

маємо:

$$\sigma_{сж} = 0,12 + 0,119 \cdot q_{зр}, \quad (10)$$

$$\sigma_{сж} = 0,576 + 0,0128 \cdot t - 0,7322 \cdot e^{-0,04373 \cdot T} \quad (11)$$

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** З наведеного дослідження можна зробити наступні висновки:

- для контролю якості ґрунтоцементних елементів поряд з загальноприйнятими методами повноправно може використовуватись метод статичного зондування розширеним наконечником;

- залежності питомого опору зондуванню (пенетрації), модуля деформації ґрунтоцементу, кількості гідратованого цементу в матеріалі від терміну тужавіння матеріалу мають між собою лінійну залежність, тому використання методу статичного зондування разом із застосуванням отриманих залежностей (8) та (11) дозволить проводити контроль якості ґрунтоцементних елементів з врахуванням температурних умов та терміну їх тужавіння.

## ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Коган В.В., Гончаров Б.В., Гареева Н.Б. Применениестатическогозондирования для контролякачествавай при струйнойтехнологии. // Эффективные фундаменты, сооружаемые без выемки грунта: Тр. II Укр. науч.-техн. конф. по механике ґрунтов и фундаментаостроению. – Полтава: изд-во Полт.техн. ун-та. – 1995. – Ч.1. – С.100-103.
2. Разоренов В.Ф. Пенетрационныеиспытанияґрунтов. –Москва: изд. "Стройиздат", – 1968. –С.184.
3. Разоренов В.Ф. Определениестроительныхсвойствґрунтов методами пенетрации и вращательногосреза. –Киев: изд. "Будівельник", – 1967. – С. 136.
4. Зоценко М.Л. Исследованиеособенностейопределенияфизико-механическихсвойствпесчаныхґрунтов методами пенетрации и зондирования. Автореферат диссертации на соисканиеученойстепени кандидата техническихнаук., г. Воронеж, 1969.
5. Способконтролякачества цементоґрунта. Патент на изобретениеРоссийскойФедерации RU 2298789 от 10.05.2007.
6. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическаяоптимизация. - Москва.: Мир,1985.– С.509.
7. ДСТУ Б В.2.1-9-2002(ГОСТ 19912-2001)ґрунти. Методи польових випробувань статичним і динамічним зондуванням.