

Порівняння інтерпретацій даних, отриманих за допомогою СРТу та ДМТ

Вероніка ЖУК¹, Костянтин БОНДАРЕВ², Олександр П'ЯТКОВ³

Київський національний університет будівництва і архітектури

31, просп. Повітряних Сил, Київ, Україна, 03037,

¹zhuk.vv@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0002-1114-3192

²bondarev_ko_2024@knuba.edu.ua, orcid.org/0009-0007-2305-6508

³av.pyatkov@gmail.com, orcid.org/0000-0001-8797-151X

DOI: 10.32347/0475-1132.50.2025.97-105

Анотація. У дослідженні розглянуто особливості сучасних методів інженерно-геологічних досліджень із застосуванням методик статичного зондування СРТу та дилатометричних випробувань ДМТ, які дедалі активніше впроваджуються в українську геотехнічну практику як високоточні польові способи отримання розрахункових параметрів ґрунтового середовища.

Метод СРТу базується на безперервному зануренні конусного пенетрометра із визначенням опору під конусом q_c , фрикційного опору (тертя бокової поверхні) f_s та порового тиску u_2 (що визначається спеціальним датчиком). Метод ДМТ полягає у вимірюванні тиску (P_0, P_1, P_2) за допомогою сталюї лопатки з рухомою мембраною, що розширюється. Отримані дані аналізуються через емпіричні кореляції для визначення розрахункових значень показників міцності та деформативності ґрунтів.

Для порівняння отриманих параметрів ґрунтів було використано данні на основі вимірювань в польових умовах. Випробування проводили для різних типів ґрунтів серед них були пілуваті піски, супіски, суглинки, глини та органічні відклади, на глибині від 2.6 до 6 м. У межах дослідження порівнювались такі параметри: коефіцієнт прекозсолідації OCR , модуль стисливості M та недренована міцність на зсув s_u . Проаналізовано специфіку вимірювань та інтерпретацій для кожного методу. Отримано відмінності між методами, зокрема виражену дискретність результатів СРТу на деяких проміжках свердловини. Це може бути обумовлено особливостями методики збору та інтерпретації даних СРТу. Такі різкі стрибки на графіку у визначених параметрах можуть виникати в зв'язку з більшою частотою вимірів методом СРТу, та різними ділянками для вимірювання. Також є ймовірність потрапляння



Вероніка ЖУК

доцент кафедри
геотехніки
к.т.н., доц.



Костянтин БОНДАРЕВ

аспірант кафедри
геотехніки



Олександр П'ЯТКОВ

доцент кафедри
геотехніки
к.т.н., доц.

на більш щільні відкладення або тверді вкраплення в певних місцях вимірювань. Натомість дані, отримані за допомогою ДМТ, демонструють більш стабільну та плавну зміну параметрів по глибині, що обумовлюється іншим механізмом дії та прямим вимірюванням модуля деформації ґрунту.

Отримано, що для відповідальних об'єктів в складних інженерно-геологічних умовах варто виконувати "Випробувальний вузол" що буде включати виконання свердловини, СРТу, ДМТ в одному пункті. Такий підхід дозволить отримати данні для проектування, що відповідають різним рівням напружень в ґрунті, та в залежності від

характеру роботи споруди дозволить обрати, коректні вхідні дані для розрахунку.

Ключові слова. статичне зондування (СРТу), дилатометричне випробування (DMT), розрахункові параметри ґрунтів, інтерпретація даних, польові випробування.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Сучасна геотехнічна практика дедалі частіше орієнтується на високоточні польові методи дослідження ґрунтів, серед яких провідне місце займають статичне зондування (СРТу) та дилатометричне зондування (DMT). Обидва методи широко застосовуються у проектуванні фундаментів, однак кожен із них має свої особливості та обмеження. У представленому дослідженні виконано системний аналіз подібностей і відмінностей між параметрами ґрунтів, отриманих за результатами інтерпретації даних СРТу і DMT.

МЕТА РОБОТИ

Метою дослідження є порівняння параметрів ґрунтів, що отримані в результаті польових випробувань СРТу та DMT на одному дослідному майданчику. Дослідити вплив інтерпретації даних на міцнісні та деформативні параметри ґрунтів. Аналізувалися такі параметри: коефіцієнт прекоңсолідації OCR , модуль стисливості M та недренована міцність на зсув s_u для виявлення закономірностей та відмінностей отриманих результатів, обґрунтування вибору відповідних параметрів для подальших розрахунків.

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Під час дослідження було розглянуто принцип збору даних методом СРТу (Robertson, P.K., 2009) та DMT та інтерпретацію цих даних з метою отримати ефективні характеристики ґрунту. Порівняно отриманні характеристики ґрунту, виявлено закономірності та розбіжності.

Методика статичного зондування СРТу та дилатометричних випробувань DMT

Під час проведення СРТу (Cone Penetration Test) тесту використовують конусний пенетрометр, який постійно просувається в ґрунт із сталим кроком в 2 см. Вимірювальний прилад СРТу включає конусний наконечник та фрикційну втулку показано на Рис. 1, спеціалізовані елементи, які забезпечують точне вимірювання сил опору. Системи оснащені окремими датчиками навантаження, що дозволяють точно розділити загальний опір ґрунту на його складові: q_c - опір під конусом та f_s - тертя по бічній поверхні (Robertson, P.K., 2022).

Також доволі розповсюджене використання вимірювального елемента - п'єзометра, який встановлений за конусом, для отримання показників порового тиску u_2 . Така конфігурація дозволяє поміряти рівень порового тиску. Електроніка всередині зонда перетворює виміряні сили та тиски у цифровий сигнал, який передається у режимі реального часу до контрольного блоку. Під час збору даних йде безперервне занурення зонда.

Під час проведення СРТу тесту отримують 5 вимірювань за одне випробування (Бондарева Л. та інші, 2024). Вимірювані показники:

- q_c - опір під конусом, МПа;
- f_s - тертя по бічній поверхні, кПа;
- u_2 - поровий тиск, кПа;
- h - глибина занурення зонда, м;
- i - кут нахилу зонда, град.



Рис.1. Зонд СРТу
Fig.1. Probe CPTu

Під час проведення DMT тесту (Marchetti's dilatometer testing) використовують зонд, який складається із сталюї лопатки шириною 9,5 см, товщиною 1,4 см з круглою гну-

чкою мембраною на одній із сторін, діаметром 60 мм опуклої форми показано на Рис. 2. Прилад працює за принципом вимірювання пневматичного впливу на мембрану (Robertson, P.K., 2015). Газ з резервуара через пневматично-електричну систему надходить до мембрани для досягнення заданої величини розширення 1,1 мм. До та після розширення фіксуються відповідні величини тиску P_0 та P_1 .

Контрольний блок з датчиками тиску вимірює тиск на різних стадіях процесу – до розширення мембрани P_0 , під час розширення P_1 та після повернення мембрани в початкове положення P_2 . Лопатка вводиться в ґрунт кроками по 20 см з послідовним фіксуванням даних. Передача даних в режимі реального часу дозволяє оперативно аналізувати властивості ґрунту.

Під час проведення DMT тесту отримують 4 вимірювань за одне випробування (Monaco, P., 2007). Вимірювані показники:

- P_0 - тиск перед розширенням мембрани, МПа;
- P_1 - тиск при розширенні мембрани на 1.1 мм, МПа;
- P_2 - тиск після випробування, МПа;
- h - глибина занурення лопатки, м.

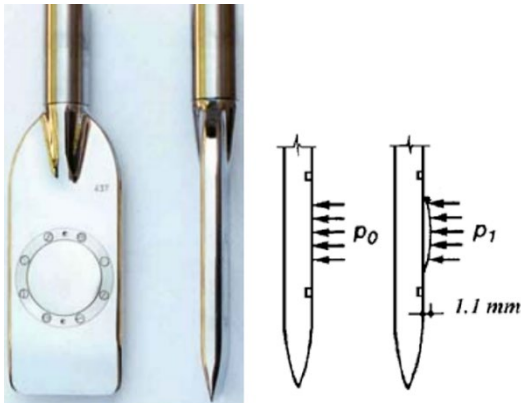


Рис.2. Лопатка DMT
Fig.2. DMT blade

Отримані дані аналізуються за допомогою емпіричних кореляцій і нормалізаційних методів, що обліковують вищі вертикальні напруження σ_{v0} при більшій глибині (без нормування абсолютні тиски зростатимуть навіть за однакових механічних властивостей ґрунту) (Maune, P.W., 2007). Це дозволяє оці-

нити тип ґрунту, його міцність, модуль деформації, індекс матеріалу ґрунту, коефіцієнти жорсткості, та інші параметри, стану ґрунту.

З вимірних даних СРТу можна отримати на основі інтерпретації такі показники:

- R_f - коефіцієнт тертя, д.о.(%)
- γ - питома вага ґрунту, кН/м³
- F_r - нормований коефіцієнт тертя, д.о.
- I_c - індекс консистенції ґрунту, д.о.
- k - коефіцієнт фільтрації, д.о.
- ϕ' - ефективний кут внутрішнього тертя, град.
- OCR - коефіцієнт прекоңсолідації, д.о.
- σ_{v0} - повні вертикальні напруження, кПа
- σ'_{v0} - ефективні вертикальні напруження, кПа
- Q_t - нормований опір під конусом, МПа
- K_0 - коефіцієнт бокового тиску, д.о.
- s_u - недренована міцність на зсув, кПа
- E - модуль деформацій, МПа
- M - модуль стисливості, МПа
- I_p - число пластичності, д.о.
- I_L - показник текучості, д.о.
- c_v - коефіцієнт коңсолідації, д.о.
- C_c - індекс стиснення, д.о.

З вимірних даних DMT можна отримати такі показники:

- I_D - дилатометричний індекс матеріалу, д.о.
- K_D - індекс горизонтальних напружень, д.о.
- E_D - дилатометричний модуль, МПа
- K_0 - коефіцієнт бокового тиску, д.о.
- OCR - коефіцієнт прекоңсолідації, д.о.
- M_{DMT} - модуль стисливості, МПа
- $s_u (c_u)$ - недренована міцність на зсув, кПа
- ϕ' - ефективний кут внутрішнього тертя, град.
- σ'_{v0} - ефективні вертикальні напруження, кПа.

Для порівняння отриманих параметрів ґрунтів використовували дані вимірювань, взятих з реального об'єкта. Випробування проводили для зв'язних ґрунтів "пилуваті піски - суглинки, супіски" та для "органічних ґрунтів і глини" на глибині від 2.6 до 6 м (Бондарева Л. та інші, 2024). Залягання більш слабких ґрунтів виявлено за допомогою СРТу.

Для порівняння було обрано 3 параметри

грунту: коефіцієнт преkonsolidaції OCR, модуль стисливості M , недренована міцність на зсув s_u .

Порівняння коефіцієнта преkonsolidaції OCR.

Результати порівняння закономірності розподілу значень коефіцієнта преkonsolidaції OCR з глибиною наведено на Рис. 3.

За даними, отриманими за допомогою CPTu, показник OCR (рис. 3) визначали за методиками Robertson та Mayne (Grabar, K., 2022):

$$OCR = k \frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{v0}} \quad (1)$$

де k – коефіцієнт, д.о. :

$$k = \left[\frac{Q_{t1}^{0.2}}{0.25 * (10.5 + 7 \log F_r)} \right]^{1.25} \quad (2)$$

F_r - нормований коефіцієнт тертя, д.о.:

$$F_r = [(f_s / (q_t - \sigma_{v0})) * 100\% \quad (3)$$

Q_t - нормований опір під конусом, МПа:

$$Q_t = (q_t - \sigma_{v0}) / \sigma'_{v0} \quad (4)$$

q_t - скоригований опір конуса, МПа:

$$q_t = q_c - u_2(1 - a) \quad (5)$$

a - коефіцієнт чистої площі, д.о.

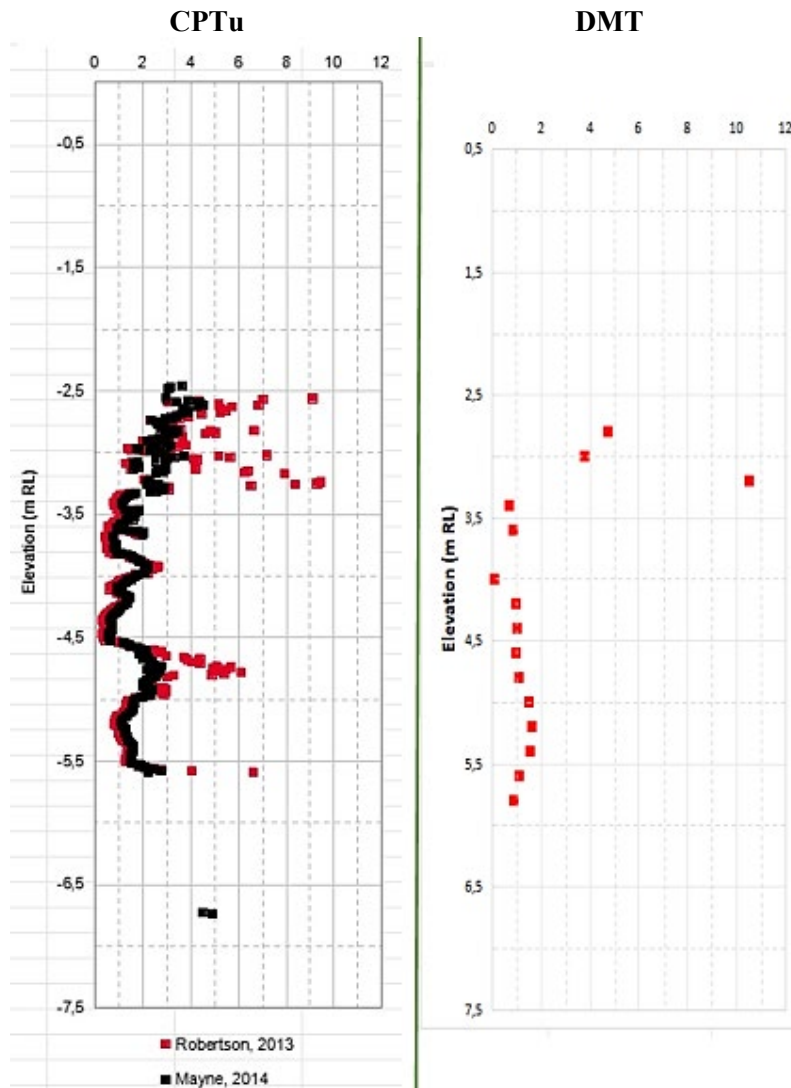


Рис.3. Порівняння OCR
Fig.3. Comparison OCR

σ_{v0} - повні вертикальні напруження, кПа:

$$\sigma_{v0} = \sum(z_i * \gamma_i) \quad (6)$$

γ_i - маса одиниці ґрунту і-го шару

z_i - глибина і-го шару від поверхні землі, м

$$\sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u_2 \quad (7)$$

σ'_{v0} - ефективні вертикальні напруження, кПа

σ'_p - напруження попередньої консолідації, кПа:

$$\sigma'_p = 0.33(q_t - \sigma_{v0})^m (Pa/100)^{1-m} \quad (8)$$

m - степеневий показник:

$$m = 1 - \frac{0.28}{1 + (I_c/2.65)^{2.5}} \quad (9)$$

I_c - індекс консистенції ґрунту, д.о.:

$$I_c = ((3.47 - \log Q_t)^2 + (\log F_r + 1.22)^2)^{0.5} \quad (10)$$

За даними, отриманими за допомогою DMT, показник OCR визначали за формулою:

$$OCR = (0.5K_D)^{1.56} \quad (11)$$

K_D - індекс горизонтальних напружень, д.о.:

$$K_D = P_0 - u_0 / \sigma'_{v0} \quad (12)$$

u_0 - поровий тиск, кПа

Коефіцієнт прекопсолідації OCR на глибині 2,7...3,7 м для DMT і CPTu є близьким за значенням.

На глибині 4 м OCR_{DMT} має значення майже 0. В той час як OCR_{CPTu} має значення від 2 до 3х одиниць.

На глибині від 4,5м до 5 OCR_{DMT} має значення близько 1,1 од. В той час як $OCR_{CPTu(Mayne)}$ має значення близько 2,5 од., а $OCR_{CPTu(Robertson)}$ сягає 5 од.

Інтерпретація OCR за даними випробувань DMT має більш плавну лінію, в той час як інтерпретація OCR за даними випробувань має стрибки показано на Рис. 3. Особливо відрізняються данні на позначці 4,8 де $OCR_{DMT} =$

1,1 од. $OCR_{CPTu(Mayne)} = 2,5$ од. $OCR_{CPTu(Robertson)} = 5,5$. Відповідно $OCR_{CPTu(Mayne)} > OCR_{DMT}$ в 2,3 рази, а $OCR_{CPTu(Robertson)} > OCR_{DMT}$ в 5 разів. Наявність таких стрибків пов'язана з більшою частотою вимірів методом CPTu, та різними ділянками для вимірювання. Що дає змогу зустріти більш щільні відкладення або тверді вкраплення в певних місцях вимірювань. Вимірювання CPTu та DMT в межах однієї ділянки проводяться на відстані 1-2м.

Порівняння модуля стисливості M .

Результати порівняння закономірності розподілу значень модуля стисливості M з глибиною наведено на рис. 4.

За даними, отриманими за допомогою CPTu, модуль стисливості M визначали за формулою:

$$M = \alpha_M (q_t - \sigma_{v0}) \quad (13)$$

α_M - змінюється в залежності від Q_t :

при умові, що $I_c > 2,2$ (дрібнозернисті ґрунти) приймають:

$$\alpha_M = Q_t \quad \text{якщо } Q_t < 14$$

$$\alpha_M = 14 \quad \text{якщо } Q_t > 14$$

За даними, отриманими за допомогою DMT, модуль стисливості M , МПа визначали за формулою:

$$M_{DMT} = R_M \cdot E_D \quad (14)$$

E_D - дилатометричний модуль, МПа

$$E_D = 34.7(P_1 - P_0) \quad (15)$$

R_M визначається від:

$$\text{якщо } I_D \leq 0.6 \quad R_M = 0.14 + 2.36 \log K_D$$

$$\text{якщо } I_D \geq 3 \quad R_M = 0.5 + 2 \log K_D$$

$$\text{якщо } 0.6 < I_D < 3 \quad R_M = R_{M,0} + (2.5 - R_{M,0}) \log K_D$$

$$\text{при } R_{M,0} = 0.14 + 0.15(I_D - 0.6)$$

$$\text{якщо } K_D > 10 \quad R_M = 0.32 + 2.18 \log K_D$$

$$\text{якщо } R_M < 0.85 \quad R_M = 0.85$$

I_D - дилатометричний індекс матеріалу, д.о.:

Графік порівняння модуля стисливості M показано на Рис. 4 повторює поведінку графіку порівняння OCR, ця закономірність збе-

$I_D = P_1 - P_0 / P_0 - u_0$ (16)
рігається як для розрахунків на основі вимірювань DMT, так і для CPTu.

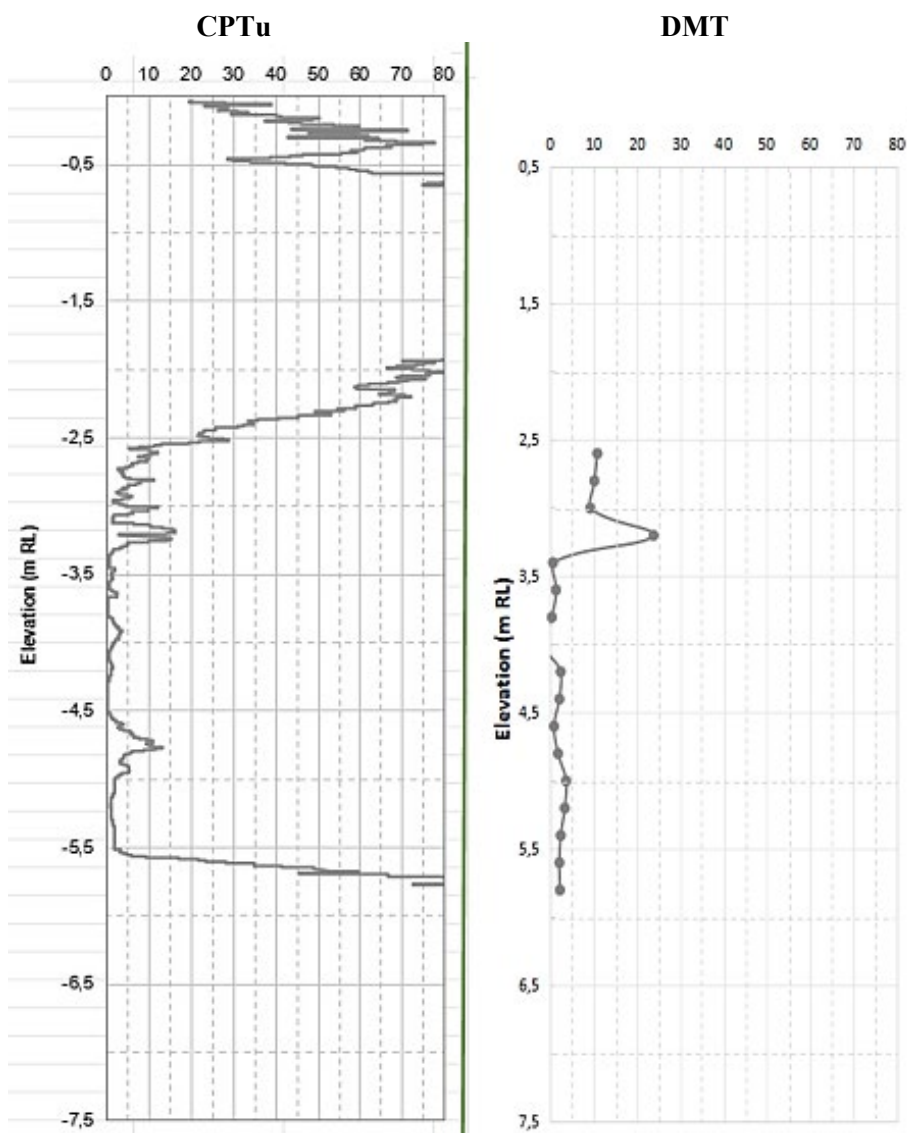


Рис.4. Порівняння модуля стисливості M , МПа
Fig.4. Comparison constrained modulus M , МПа

На глибині 3,2 м M_{DMT} має показник 23,8 МПа, в той час M_{CPTu} 16,2 МПа. Що майже в 1.5 разів більше.

На глибині 4,8 м M_{DMT} має показник 1,9 МПа та зберігає плавність лінії, в той час M_{CPTu} дорівнює 11,5 МПа і має стрибок на графіку. На інших глибинах показники близькі за значеннями. Це вказує на коректність інтерпретації даних за рахунок аналізу двох різних методик випробувань.

Порівняння недренованої міцності на зсув s_u .

Результати порівняння закономірності розподілу значень недренованої міцності на зсув s_u з глибиною наведено на Рис. 5.

За даними отриманими за допомогою CPTu, недреновану міцність на зсув s_u , визначали за формулою:

$$s_u = q_t - \sigma_{v0} / N_{kt} \tag{17}$$

де N_{kt} – коефіцієнт конуса:

$$N_{kt} = 10.5 + 7 \log F_r \tag{18}$$

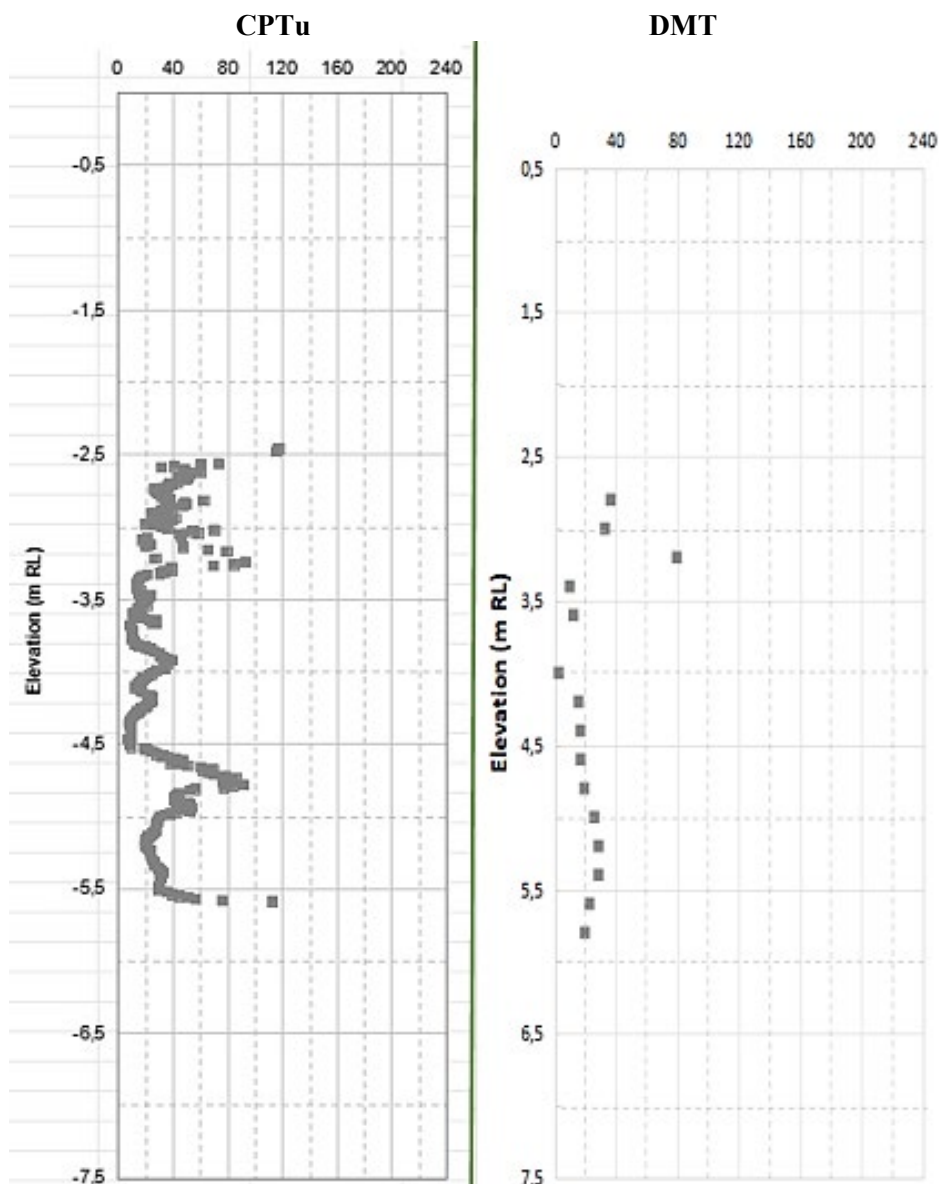


Рис.5. Порівняння недренованої міцності на зсув s_u , кПа
Fig.5. Comparison Undrained Shear Strength s_u , kPa

За даними, отриманими за допомогою DMT, недренована міцність на зсув s_u , кПа визначається за формулою:

$$s_u = 0.22 \sigma'_{v0} (0,5K_D)^{1.25} \quad (19)$$

Недренована міцність на зсув s_u на відмітці 4.8 м має яскраво виражений пік на графіку CPTu, чого не спостерігається на графіку DMT. Розбіжність складає 4,8 рази: показник на основі вимірювань DMT складає $s_u=19,2$ кПа, а показник на основі вимірювань CPTu відповідно $s_u=91,7$ кПа (рис. 5).

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Проаналізовано інтерпретації параметрів ґрунту, що одержуються за допомогою методик статичного зондування CPTu та дилатометричних випробувань DMT.

Виконано порівняння розрахункових значень наступних показників: коефіцієнт прекозсолідації OCR , модуль стисливості M та недренована міцність на зсув s_u .

Отримано відмінності між методами, зокрема виражену дискретність результатів CPTu на деяких проміжках свердловини, у

порівнянні з більш плавною поведінкою даних на графіку, отриманих методом DMT в слабких ґрунтах. Це може бути обумовлено особливостями методики збору та інтерпретації даних СРТу. Такі різкі стрибки на графіку у визначених параметрах можуть виникати в зв'язку з більшою частотою вимірів методом СРТу, та різними ділянками для вимірювання. Що дає змогу зустріти більш щільні відкладення або тверді вкраплення в певних місцях вимірювань.

Також порівняння графіків на інших глибинах, в межах випробувань, вказує на близькі за значеннями показники. Це вказує на коректність інтерпретації даних за рахунок аналізу двох різних методик випробувань.

Виявлено за результатами аналізу перевагу використання комбінованого підходу та калібрування емпіричних кореляцій для забезпечення достовірності отриманих ґрунтових параметрів, що є важливим для числового моделювання взаємодії основ і фундаментів та оптимізації інженерних рішень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бондарева, Л., Зіменко, І. & Бондарев, К. (2024) Інтерпретації даних сучасних методів польових досліджень ґрунтів *Основи та фундаменти*, 48, 61-74. DOI: 10.32347/0475-1132.48.2024.61-74
2. Grabar, K., Strelec, S., Špiranec, M., & Dodigović, F. (2022). CPT–DMT correlations on regional soils from Croatia. *Sensors*, 22(3), 934. <https://doi.org/10.3390/s22030934>
3. Mayne, P.W. (2007) NCHRP Synthesis ‘Cone Penetration Testing State-of Practice’. *Transportation Research Board Report Project*, 20-05. 118 p. www.trb.org
4. Monaco, P., Marchetti, S., & Totani, G. (2007). The Flat Dilatometer Test (DMT): Design applications and recent developments. In *Proceedings of the 10th Australia New Zealand Conference on Geomechanics* (pp. 516–520). International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE).
5. Robertson, P.K. & Cabal, K. (2022). Guide to cone penetration testing. 7th edition. *Gregg Drilling LLC*. 164 p. <https://www.cpt-robertson.com/PublicationsPDF/CPT-Guide-7th-Final-SMALL.pdf>
6. Robertson, P.K. (2009). Interpretation of cone penetration tests – a unified approach. *Can. Geotech J.* 46: 1337-1355. doi: 10.1139/T09-065

J. 46: 1337-1355. doi: 10.1139/T09-065

7. Robertson, P.K. (2015). Soil behavior type using the DMT. Gregg Drilling & Testing Inc. Retrieved from internal conference material.

REFERENCES

1. Bondareva, L., Zimenko, I. & Bondarev, K. (2024) Interpretatsii danykh suchasnykh metodiv polovykh doslidzhen gruntiv [Interpretation of the data of modern methods of field soil research] *Osnovy ta Fundamenty*, 48, 61-74. DOI: 10.32347/0475-1132.48.2024.61-74 (in Ukrainian)
2. Grabar, K., Strelec, S., Špiranec, M., & Dodigović, F. (2022). CPT–DMT correlations on regional soils from Croatia. *Sensors*, 22(3), 934. <https://doi.org/10.3390/s22030934>
3. Mayne, P.W. (2007) NCHRP Synthesis ‘Cone Penetration Testing State-of Practice’. *Transportation Research Board Report Project*, 20-05. 118 p. www.trb.org
4. Monaco, P., Marchetti, S., & Totani, G. (2007). The Flat Dilatometer Test (DMT): Design applications and recent developments. In *Proceedings of the 10th Australia New Zealand Conference on Geomechanics* (pp. 516–520). International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE).
5. Robertson, P.K. & Cabal, K. (2022). Guide to cone penetration testing. 7th edition. *Gregg Drilling LLC*. 164 p. <https://www.cpt-robertson.com/PublicationsPDF/CPT-Guide-7th-Final-SMALL.pdf>
6. Robertson, P.K. (2009). Interpretation of cone penetration tests – a unified approach. *Can. Geotech J.* 46: 1337-1355. doi: 10.1139/T09-065
7. Robertson, P.K. (2015). Soil behavior type using the DMT. Gregg Drilling & Testing Inc. Retrieved from internal conference material.

Comparison of interpretations of data obtained using CPTu and DMT.

Veronika ZHUK
Kostiantyn BONDAREV
Oleksandr PIATKOV

Summary The study examines the features of modern methods of engineering geological research using static probing CPTu and dilatometric testing DMT, which are increasingly being introduced into Ukrainian geotechnical practice as high-precision

field methods for obtaining calculated parameters of the soil environment.

The CPTu method is based on continuous immersion of a cone penetrometer with determination of the resistance under the cone q_c , the frictional resistance (side surface friction) f_s and the pore pressure u_2 (determined by a special sensor).

The DMT method consists of measuring the pressure (P_0 , P_1 , P_2) using a steel vane with a movable expanding membrane. The obtained data are analyzed through empirical correlations to determine the calculated values of the strength and deformability indicators of soils.

To compare the obtained soil parameters, data based on field measurements were used. The tests were conducted in the soil range “from silty sand to sandy dust” and “from organic soils to clays” at a depth of 2.6 to 6 m.

The following parameters were compared within the study: preconsolidation ratio OCR, compressive modulus M , and undrained shear strength s_u .

The specifics of measurements and interpretations for each method were analyzed. Differences between the methods were obtained, in particular, the pronounced discreteness of CPTu results compared to the smoother behavior of data obtained by the DMT method in weak soils.

It has been established that the interpreted data by CPTu are characterized by increased discreteness, i.e. sharp fluctuations of values, which are associated with the influence of pore pressure and the peculiarity of the design that measures the data. This does not always correct reflection of changes in soil properties.

In contrast, data obtained using DMT demonstrates a more stable and smooth change in parameters with depth, which is due to a different mechanism of action and direct measurement of the soil deformation modulus.

A conclusion is made regarding the feasibility of using an integrated approach combining the results of both methods, as well as the need for correct calibration of empirical dependencies.

The study emphasizes the need for an integrated approach and calibration of empirical correlations to increase the reliability of geotechnical parameters, which is critically important for optimizing engineering solutions in foundation design.

Keywords. cone penetration test (CPTu), dilatometer test (DMT), designed soil parameters, data interpretation, field tests.