

Ідентифікація розрахункових параметрів моделі ґрунту Hardening Soil на базі лабораторних випробувань ґрунту

Віктор Носенко ¹, Дмитро Нечипоренко ², Олексій Фадєєв ³

^{1,2} Київський національний університет будівництва і архітектури
31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037,

¹nosenko.vs@knuba.edu.ua, orcid.org/ 0000-0002-8261-1846

²dimanechiporenko072@gmail.com, orcid.org/ 0009-0006-6697-2381

³ ТОВ "ОСНОВА" 17, вул. Ковпака, Київ, Україна, 03150

³info@osnova-group.com.ua

DOI: 10.32347/0475-1132.47.2023.61-74

Анотація. Розглянуто питання визначення на основі лабораторних випробувань ґрунтів у приладах компресійного та тривісного стиску параметрів сучасної моделі ґрунту Hardening Soil, яка використовується в багатьох програмних комплексах, призначених для розв'язання геотехнічних задач. Модель дозволяє враховувати зміни деформаційних параметрів ґрунтів в залежності від рівня діючих напружень та описати процеси деформування дисперсних ґрунтів при складних траєкторіях навантаження /розвантаження.

Також у роботі представлені результати лабораторних досліджень глини напівтвердої «київський мергель» в приладі тривісного стиску і одометрі. На основі цих даних визначалися міцнісні параметри ґрунту: ефективне зчеплення (c') і ефективний кут внутрішнього тертя (ϕ'), а також деформаційні параметри модулі деформації: E_{50}^{ref} , E_{oed}^{ref} , E_{ur}^{ref} .

Для кореляції результатів числового моделювання з реальною поведінкою глинистого ґрунту в програмному комплексі Plaxis, використовуючи віртуальну лабораторію SoilTest, моделювалося випробування в приладі тривісного стиску та виконувалась ідентифікація параметрів ґрунту. Такий підхід дозволяє підвищити точність і якість результатів розрахунку.

Було визначено, що найбільш чутливими параметрами є січний модуль жорсткості E_{50}^{ref} та коефіцієнт руйнування R_f . Їх чутливість у відсотках відповідно складає 65,9% та 32%.

Варіюючи характеристики c' і ϕ' , під час випробувань у віртуальній лабораторії моделювалося руйнування зразка відповідно до



Віктор Носенко
завідувач кафедри
геотехніки
к.т.н. доцент



Дмитро Нечипоренко
аспірант кафедри
геотехніки



Олексій Фадєєв
Директор департаменту
інженерних вишукувань ТОВ
"ОСНОВА"

реальних досліджень ґрунту. Тому дуже важливо правильно визначати ці параметри, адже це може призвести до недооцінки або ж навпаки переоцінки міцності ґрунтової основи.

Приведено результати ідентифікації основних параметрів моделі Hardening Soil за допомогою віртуальної лабораторії SoilTest. У ПК Plaxis досягнуто відхилення результатів числового моделювання випробувань та даних фактичних лабораторних випробувань в межах 5%.

Ключові слова. модель Hardening Soil, модуль деформації, параметри моделі, лабораторні випробування, прилад тривісного стиску, одометр, ідентифікація параметрів.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

В сучасних умовах будівництва перед інженерами-геотехніками постає багато різноманітних складних задач і для їх вирішення сьогодні часто використовують числове моделювання процесів взаємодії конструкцій з ґрунтовим середовищем із застосуванням сучасного геотехнічного програмного забезпечення (Plaxis, GEO5, Midas GTS NX, Zsoil та ін.). Програмні комплекси дозволяють моделювати еволюцію напружено-деформованого стану ґрунтового масиву та геотехнічних об'єктів на різних етапах їх життєвого циклу. Основним питанням є вибір та обґрунтування параметрів моделі ґрунтового середовища, яка враховує зміни пов'язані з утворенням (первинною консолідацією) та змінами (можливим переущільненням) у напруженому стані ґрунтового масиву до початку будівництва, розвантаженням внаслідок розробки котлованів і повторним поступовим навантаженням із зміною жорсткості ґрунтової основи та конструкцій будівель і споруд, що відбувається у процесі будівництва робіт та у перспективі із проявами вторинної консолідації під час експлуатації.

Однією з моделей, що може описувати процеси деформування дисперсних ґрунтів при складних траєкторіях навантаження /розвантаження та враховувати зміни деформаційних параметрів ґрунтів в залежності від рівня діючих напружень є модель Hardening Soil model (HS), що була запропонована Schanz, T., Vermeer, P., Bonier, P. та іншими у роботі [1] і сьогодні реалізована у багатьох геотехнічних програмних комплексах. Визначення фактичних значень її параметрів із використанням сучасного лабораторного обладнання в українських геотехнічних реаліях є актуальною задачею. Отриманий під час вирішення цієї задачі досвід дає змогу в подальшому вірно вибирати програму випробувань ґрунтів в залежності від режимів їх подальшого навантаження, проводити ідентифікацію параметрів моделі

на базі лабораторних випробувань ґрунтів та обґрунтовано застосовувати дану модель при числовому моделюванні геотехнічних задач.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

У роботі Schanz, T., Vermeer, P., Bonier, P. була вперше описана і запропонована модель Hardening Soil (HS) [1]. Ідея покладена авторами в основу моделі HS це гіперболічна залежність між девіаторним навантаженням і осьовою деформацією та залежність модуля жорсткості ґрунту від рівня напружень.

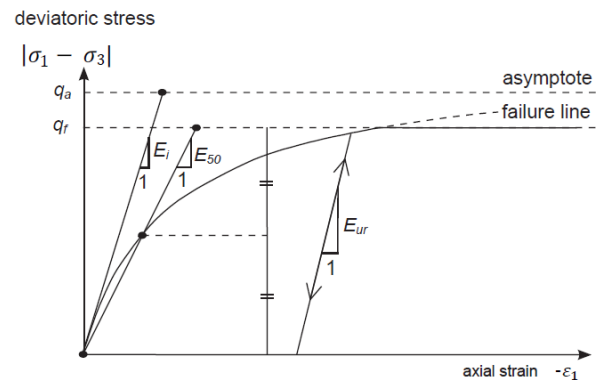


Рис.1. Гіперболічна залежність між напруженнями і деформаціями для стандартного консолідовано-дренованого випробування тривісного стиску.

Fig. 1. Hyperbolic stress-strain relation in primary loading for a standard drained triaxial test.

На відміну від ідеально пружно-пластичної моделі з критерієм міцності Мора-Кулона, поверхня текучості в моделі HS не є фіксованою в просторі головних напружень, а може змінюватися через пластичні деформації (зміцнення ґрунту). Розрізняють два головних типи зміцнення: зміцнення при зсуві або стиску. Зміцнення при зсуві використовується щоб описати незворотні деформації в результаті первинного девіаторного навантаження. Зміцнення при стиску застосовують для моделювання незворотних пластичних деформацій при первинному навантаженні зразка ґрунту в одометрі та ізотропному навантаженню.

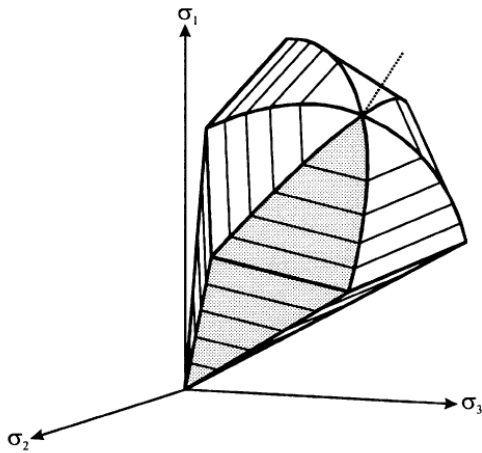


Рис.2. Відображення загального контуру текучості моделі Hardening Soil у просторі головних напружень для незв'язного ґрунту.

Fig.2. Representation of total yield contour of the Hardening-Soil model in principal stress space for cohesionless soil.

В посібнику [2] також була розглянута основні характерні особливості моделі та вибору її параметрів. Цілями цієї праці було висвітлення необхідності використання вдосконалених моделей ґрунту в повсякденній інженерній практиці, полегшити розуміння математичної основи HS, створення рекомендацій практикуючим інженерам для визначення або оцінки параметрів моделі, а також демонстрація важливості використання HS в типових геотехнічних задачах.

В [3] умова текучості для даної моделі описується за допомогою такого виразу:

$$-\varepsilon_1 = \frac{1}{E_i} \frac{q}{1 - q/q_a} \text{ для } q < q_f \quad (1)$$

де q_a – асимптота значення зсувної міцності; E_i – початковий модуль жорсткості, що пов'язаний з E_{50} наступною залежністю:

$$E_i = \frac{2E_{50}}{2 - R_f} \quad (2)$$

E_{50} – це залежний від всебічних напружень модуль жорсткості при первинному навантаженні:

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c \cos \varphi - \sigma'_3 \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{ref} \sin \varphi} \right)^m \quad (3)$$

де E_{50}^{ref} – це опорний модуль жорсткості при досягненні 50% міцності, що відповідає опорному всебічному тиску p^{ref} .

Граничне девіаторне напруження q_f і q_a визначаються в наступному рівнянні:

$$q_f = (c \cot \varphi - \sigma'_3) \frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \text{ та } q_a = \frac{q_f}{R_f} \quad (4)$$

Модуль жорсткості, що використовується при розвантаженні і повторному навантаженні показаний нижче:

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{c \cos \varphi - \sigma'_3 \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{ref} \sin \varphi} \right)^m \quad (5)$$

Також дана модель використовує дотичний модуль жорсткості отриманий в результаті випробувань ґрунту в одометрії і визначається за наступною формулою:

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{c \cos \varphi - \frac{\sigma'_3}{K_0^{nc}} \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{ref} \sin \varphi} \right)^m \quad (6)$$

де K_0^{nc} - коефіцієнт переущільнення ґрунту, для нормально ущільненого ґрунту за замовчуванням дорівнює $1 - \sin \varphi$.

МЕТА РОБОТИ

Ідентифікація параметрів моделі Hardening Soil для кореляції результатів числового моделювання та реальної поведінки глинистого ґрунту у широкому діапазоні зміни напружень із використанням даних лабораторних випробувань ґрунту у

сучасних автоматизованих приладах одновісного та тривісного стиску.

ЗАДАЧІ

1. Аналіз та обробка даних отриманих при проведенні лабораторних досліджень глинистого ґрунту у приладах одновісного та тривісного стиску.

2. Визначення деформаційних параметрів глинистого ґрунту на основі фактичних графіків лабораторних випробувань.

3. Ідентифікація параметрів моделі Hardening Soil за допомогою модулю SoilTest у програмному комплексі Plaxis.

ГЕОЛОГІЧНА СИТУАЦІЯ ДОСЛІДНОГО МАЙДАНЧИКУ

Дослідна ділянка на якій проводилися

геологічні вишукування розташована у м. Києві в центральній частині міста та характеризується абсолютними відмітками землі в межах 157-168 м. Геологічна будова представлена на рисунку 3 характерна для території Кловського яру.

В даній роботі основна увага приділена визначенням параметрів міцності та деформації для ґрунту - глина напівтверда «київський мергель» (ІГЕ-23), що є характерним інженерно-геологічним елементом розрізу правого берегу р. Дніпро у м. Києві і часто є основною паливних фундаментів та інших відповідальних геотехнічних об'єктів, наприклад таких як тунелі метро. Зразок даного ґрунту для випробувань у приладі тривісного стиску було відібрано з глибини 50,5 м (абс. позначка 106,6 м), а для компресійних – з 51,5 м (абс. позначка 105,6 м).

Табл. 1. Значення фізичних характеристик ґрунтів
Table. 1. Value of physical characteristics of soils

№ ІГЕ	Найменування ґрунту	Вологість, д.од.	Вологість на межі текучості, д. од.	Вологість на межі розкочування д. од.	Щільність скелету, г/см ³	Щільність мінеральних часток, г/см ³	Коефіцієнт водонасичення	Число пластичності	Показник консистенції	Коефіцієнт пористості	Коефіцієнт фільтрації, м/доба	Щільність, т/м ³
		W	W _L	W _p	ρ _d	ρ _s	S _R	I _p	I _L	e	K _ф	ρ
1a	Насипний ґрунт – супісок									0,75		1,72
2a	Супісок пластичний з лінзами та прошарками піску	0,216	0,24	0,14	1,61	2,67	0,88	0,07	0,66	0,66	0,5	1,96
16	Пісок дрібний, пілуватий, щільний, серед. ст. водонасич. * - в водонасиченому стані	0,046 0,219*			1,68	2,66	0,21 1,0*			0,58	1-3	1,76 2,05*
17	Пісок пілуватий, дрібний, щільний водонасичений	0,22			1,70	2,66	1,0			0,57	1-3	2,07
19	Суглинок м'якопластичний з лінзами та прошарками піску, ..	0,249	0,28	0,19	1,60	2,72	0,97	0,09	0,66	0,70	0,05	2,00
20	Пісок пілуватий, щільний з лінзами та прошарками глинистих ґрунтів	0,221			1,68	2,66	1,0			0,58	1-2	2,05
21	Супісок текучий з лінзами та прошарками піску пілуватого	0,215	0,22	0,18	1,72	2,71	1,0	0,04	0,88	0,58	0,5	2,09
22	Суглинок (наглинок) напівтвердий	0,249	0,4	0,26	1,58	2,70	0,94	0,14	-0,07	0,71	0,05	1,97
23	Глина напівтверда мергельна	0,259	0,47	0,25	1,57	2,7	0,95	0,22	0,04	0,687	0,001	1,97

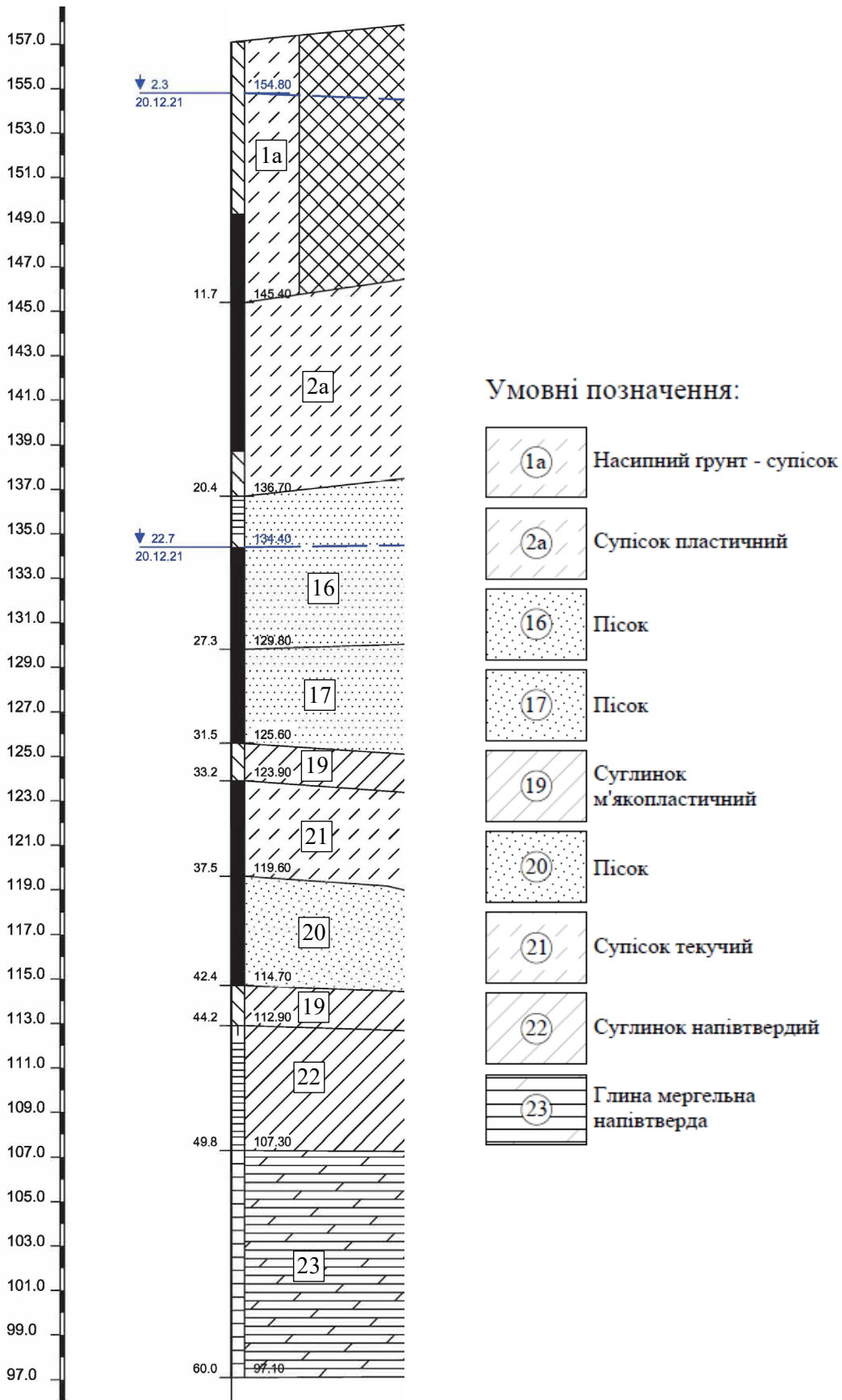


Рис. 3. Геологічна колонка.

Fig. 3. Bore hole.

ВИЗНАЧЕННЯ ЗНАЧЕНЬ
ОДОМЕТРИЧНОГО МОДУЛЯ
ДЕФОРМАЦІЇ

Одометр дозволяє визначати параметри стисливість ґрунту без можливості його бічного розширення- коефіцієнт стисливості m_0 , коефіцієнт відносної стисливості m_v та у подальшому із використанням коефіцієнт β , що залежить від коефіцієнта Пуассона обчислювати значення одометричного модуля деформації ($E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$).

Дані, які були отримані в результаті випробувань мергельної глини напівтвердої в одометрі при діапазонах тиску до 1,1 МПа

представлені нижче в Табл. 2 та на Рис. 4. Слід відмітити, що за вимогами підходів моделі HS визначення значення деформаційних параметрів необхідно виконувати при так званому референтному значенні тиску p^{ref} який геотехнік обрає самостійно в даному випадку $p^{\text{ref}} = 300$ кПа і відповідне значення одометричного модуля деформації $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ складає близько 10 МПа.

У подальшому фактичні значення модулів деформації при тисках відмінних від заданого перераховуються на основі залежностей моделі (3), (5), (6) таким чином у моделі реалізується зміна жорсткості ґрунту від рівня напружень.

Табл. 2. Результати випробувань глини в одометрі
Table. 2. Results of clay test in the oedometer system

Нормальний тиск P, МПа	h _к , см	Δh, см	Відносна деформація d _h /h _к , см	Пористість, e	Коефіцієнт стисливості, m ₀ , МПа	Коефіцієнт відносної стисливості m _v	β	E _κ , Мпа
0,000	2,50	0,000	0,000	0,687			0,74	
0,025		0,010	0,004	0,68	0,27	0,16		4,62
0,050		0,020	0,008	0,674	0,27	0,16		4,61
0,100		0,036	0,014	0,663	0,216	0,13		5,72
0,150		0,050	0,020	0,653	0,189	0,11		6,50
0,200		0,062	0,025	0,645	0,162	0,10		7,54
0,300		0,080	0,032	0,633	0,121	0,07		10,03
0,400		0,095	0,038	0,623	0,101	0,06		11,94
0,500		0,108	0,043	0,614	0,088	0,05		13,62
0,700		0,133	0,053	0,597	0,084	0,05		14,12
0,900		0,150	0,060	0,586	0,057	0,04		20,67
1,100		0,160	0,064	0,579	0,034	0,02		34,50
Глина напівтверда				v=	0,30	$m_v = \frac{m_0}{1+e_0}$	$\beta = 1 - \frac{2v^2}{1-v}$	$E_\kappa = \frac{\beta}{m_v}$
				I _L =	0,04			
				ρ, т/м ³ =	1,97			

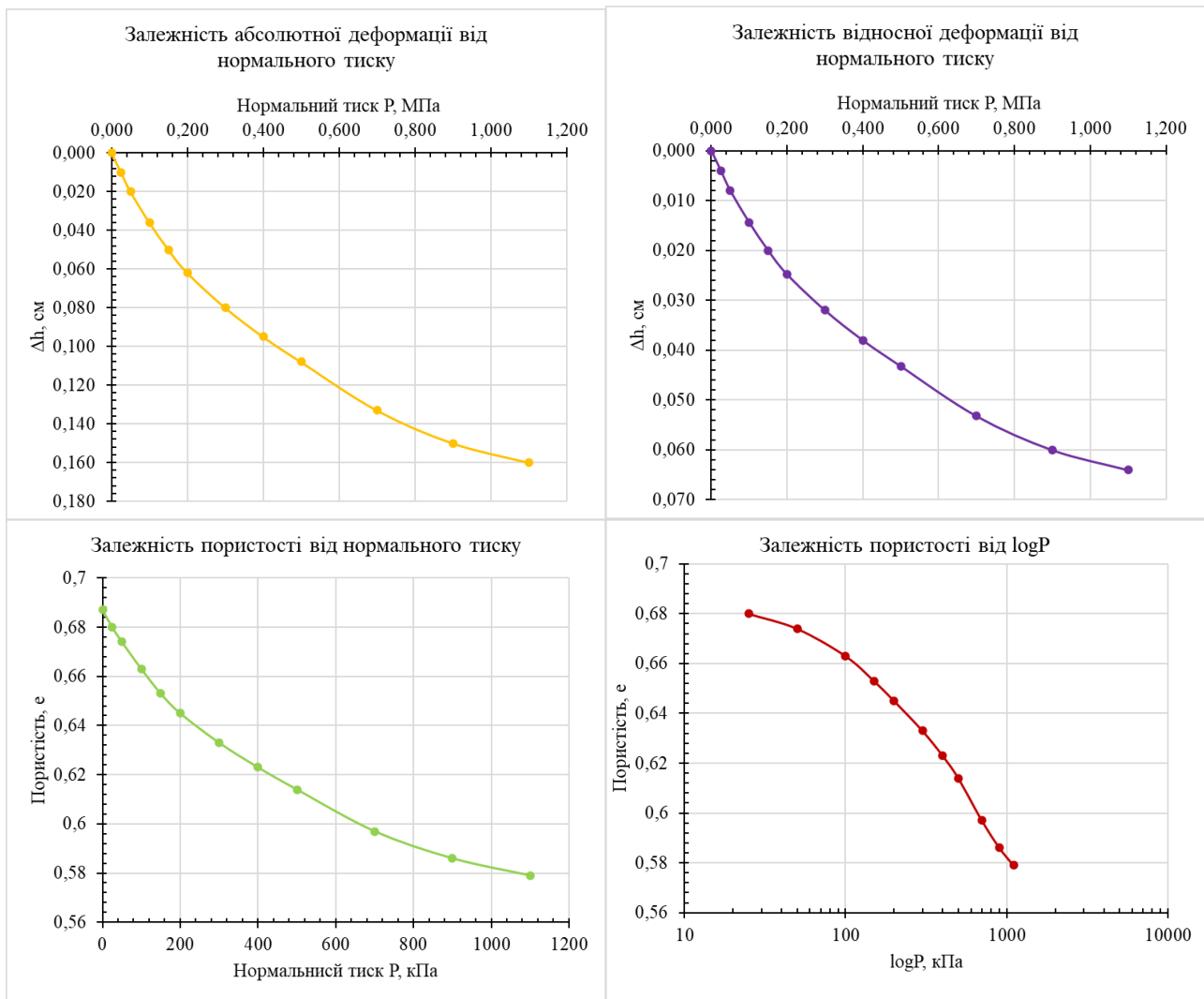


Рис. 3. Графіки отримані при випробуваннях глини в одометрі.
Fig. 3. Charts obtained during test of clay in an oedometer system.

ВИЗНАЧЕННЯ ЗНАЧЕНЬ МОДУЛІВ ДЕФОРМАЦІЇ У ПРИЛАДІ ТРИВІСНОГО СТИКУ

Випробування у приладі тривісного стиску дає можливість відтворити природній напружено-деформований стан ґрунту із дією різних горизонтального і вертикального тисків характерних для відповідних глибин.

З використанням приладу тривісного стиску Wykeham Farrance Tritech 50 на циліндричних зразках ґрунтів розміром близько 38 мм в діаметрі і 75.6 мм по висоті було проведено серію випробувань з метою визначення як параметрів міцності так і параметрів деформативності ґрунту. Навантаження на зразки ґрунту може

прикладатися статично ступенями або кінематично, тобто безперервно з фіксованою швидкістю. Під час проведення випробувань задаючи необхідну величину бічного тиску прямо вимірюються наступні величини: осьове вертикальне навантаження P , зміна висоти зразка Δh , зміна об'єму зразка ΔV і поровий тиск P_u .

Важливим чинником отримання коректних результатів випробування є якісний відбір, транспортування, підготовка до випробування зразків ґрунту та їх реконсолідація таким чином, щоб напружений стан під час випробувань максимально відповідав природному стану. Якщо цього досягнути не вдається то можна очікувати суттєвих помилок при визначенні параметрів.

Обробляючи виміряні величини, можна визначити деформаційні і міцнісні параметри ґрунту: модуль об'ємної деформації K , модуль зсуву G , модуль загальної деформації при навантаженні E та розвантаженні E_{ur} , коефіцієнт поперечної деформації ν , φ – кут внутрішнього тертя, ψ – кут дилатансії/контракції, c – питоме зчеплення.



Рис. 4. Прилад тривісного стиску.
Fig. 4. Standard Triaxial system.

Зазвичай випробування відбуваються в два етапи:

1. Створення тиску в камері приладу, що діє з усіх боків на зразок та відповідає горизонтальному тиску на глибині відбору зразку. Слід відмітити, що тут є певні складнощі із визначенням об'єктивної величини цього тиску так як для цього необхідно знати фактичну величину коефіцієнту бічного тиску K_0 , що для глинистих ґрунтів може бути визначений на основі польових випробувань, наприклад із використанням пресіометру або наближено розрахунком, наприклад із використанням залежності запропонованої $J. Jáky$ для нормально ущільнених ґрунтів.

2. Прикладання вертикального навантаження до ґрунту при постійному бічному тиску (девіаторне навантаження $q = \sigma_1 - \sigma_3$). Зазвичай приймають σ_1 – найбільше головне вертикальне напруження, $\sigma_2 = \sigma_3$ – головні напруження, що діють на бічну поверхню зразка.

При дослідженнях ґрунтів в залежності від подальшого режиму будівництва і виду ґрунту можуть використовувати одну з трьох схем випробувань:

- Неконсолідовано-недренована (для імітації швидкоплинних процесів навантаження слабких ґрунтів без можливості фільтрації);
- Консолідовано-недренована (для імітації швидких випадків навантаження звичайних ґрунтів без можливості фільтрації);
- Консолідовано-дренована (більшості випадків випробувань ґрунтів при їх довготривалих навантаженнях в основах з можливістю фільтрації).

Руйнування ґрунту відбувається по похилій поверхні (Рис. 5). Таких поверхонь може бути, як одна так і декілька, це залежить від виду ґрунту та умов навантаження.

В даній роботі розглядалися результати випробування в приладі тривісного стиску глини напівтвердої мергельної з глибини 50,5 м. Площа основи зразка складала $11,38 \text{ см}^2$, а висота 75,60 мм. Випробування проводилися по консолідовано-дренованій схемі при різних величинах бічного тиску 300кПа та 400кПа. В результаті випробувань декількох зразків даного ґрунту були отримані кола Мора на основі яких визначались ефективні значення кута внутрішнього тертя φ' та питомого зчеплення c' (Рис. 6.).

Також на основі лабораторних досліджень були побудовані графіки по осі абсцис яких відкладались значення відсотки відносної деформації ϵ , а по осі ординат або девіатор $q = \sigma_1 - \sigma_3$, або відносна об'ємна деформація $\Delta V/V$ або відношення головних напружень σ_1/σ_3 (Рис. 7).



Рис. 5. Зразок ґрунту: а) до випробування; б) після випробування.
 Fig. 5. Soil sample: a) before triaxial test; b) after triaxial test.

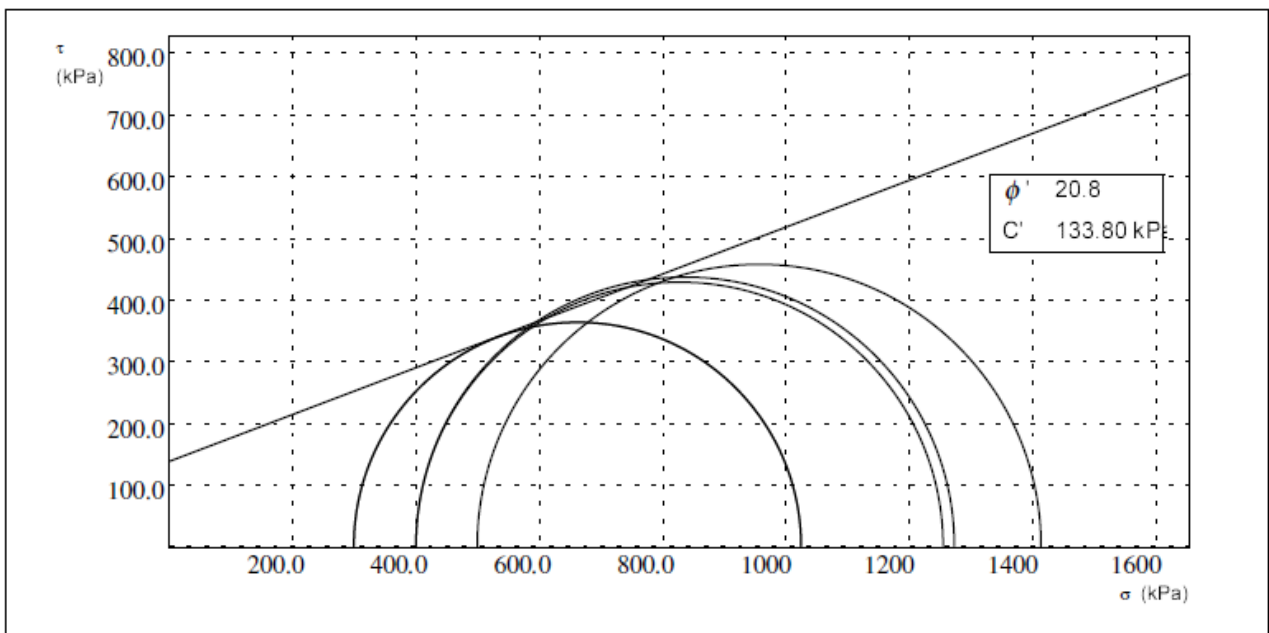


Рис. 6. Кола Мора та параметри міцності ґрунту отримані безпосередньо в результаті випробувань зразків у приладі тривісного стиску.
 Fig. 6. Mohr's circles and soil strength parameters are obtained directly from the tests of samples in the triaxial system.

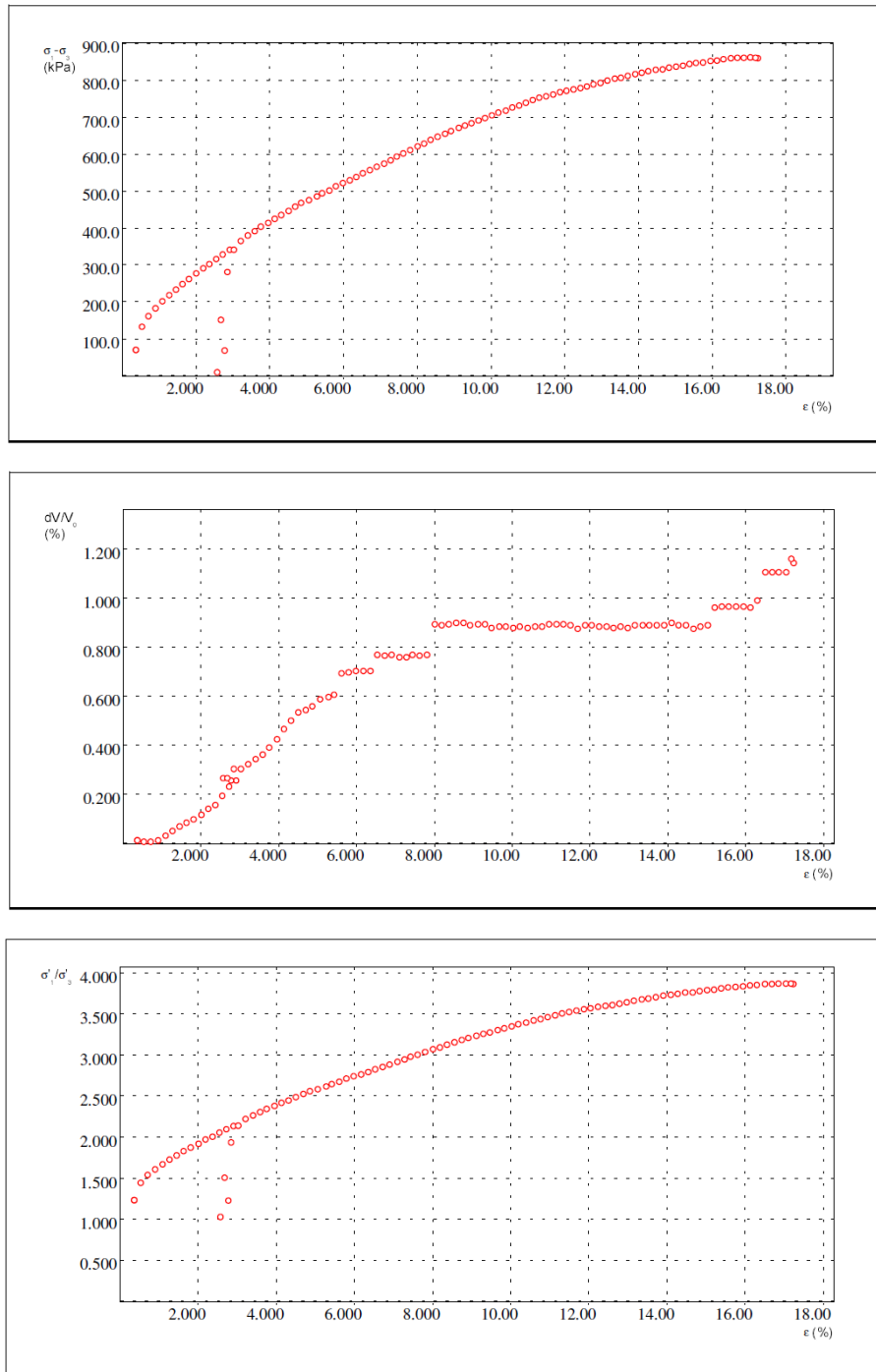


Рис. 7. Графіки отримані на основі випробувань в приладі тривісного стиску.
 Fig. 7. The charts are obtained based on tests in a triaxial system.

**ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛІ HS
 НА ОСНОВІ ДАНИХ ЛАБОРАТОРНИХ
 ВИПРОБУВАНЬ В ПРИЛАДІ ТРИВІСНОГО
 СТИСКУ**

Основні параметри моделі:

c' – ефективне зчеплення, kH/m^2 ;
 ϕ' – ефективний кут внутрішнього тертя,
 град;

ψ – кут дилатансії, град;

E_{50}^{ref} – січний модуль жорсткості при стандартному консолидовано-дренованому випробуванні ґрунту на тривісний стиск, kH/m^2 ;

$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ – дотичний модуль жорсткості при первинному навантаженні в одометрі, kH/m^2 ;

E_{ur}^{ref} – жорсткість ґрунту при розвантаженні/повторному навантаженні, кН/м^2 .

m – показник степені для залежності жорсткості від рівня напружень;

p^{ref} – тиск у ґрунті при якому визначаються відповідні значення деформаційних характеристик, кН/м^2 ;

R_f – коефіцієнт руйнування q_f/q_a .

Значеннями m та R_f можна варіювати в певних діапазонах, але правильний вибір цих параметрів дозволяє наблизити криві графіків отриманих у віртуальних лабораторіях для випробування ґрунтів (в Plaxis – це SoilTest) до справжніх результатів, які були отримані під час реальних експериментів. Величина R_f для більшості ґрунтів складає діапазон між 0,7 і 1, що ж стосується показника степені m , то його значення змінюються в певних межах для різних ґрунтів по своєму. Якщо ж ми

хочем зробити лінійну залежність між жорсткістю і напруженнями, що діють в ґрунті то можемо встановити $m=0$, це буде аналогічно до моделі з критерієм руйнування Мора-Кулона, тобто жорсткість буде незмінною при будь-яких напруженнях.

Вхідні параметри E_{50}^{ref} , E_{oed}^{ref} , E_{ur}^{ref} дають можливість моделювати деформації ґрунту більш точно.

На основі даних отриманих під час лабораторних випробувань в Microsoft Excel був побудований графік залежності між девіаторним навантаженням і осьовою деформацією (рис. 6). Значення E_{50}^{ref} та E_{ur}^{ref} розраховувалися використовуючи отриманий графік по формулі:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (7)$$

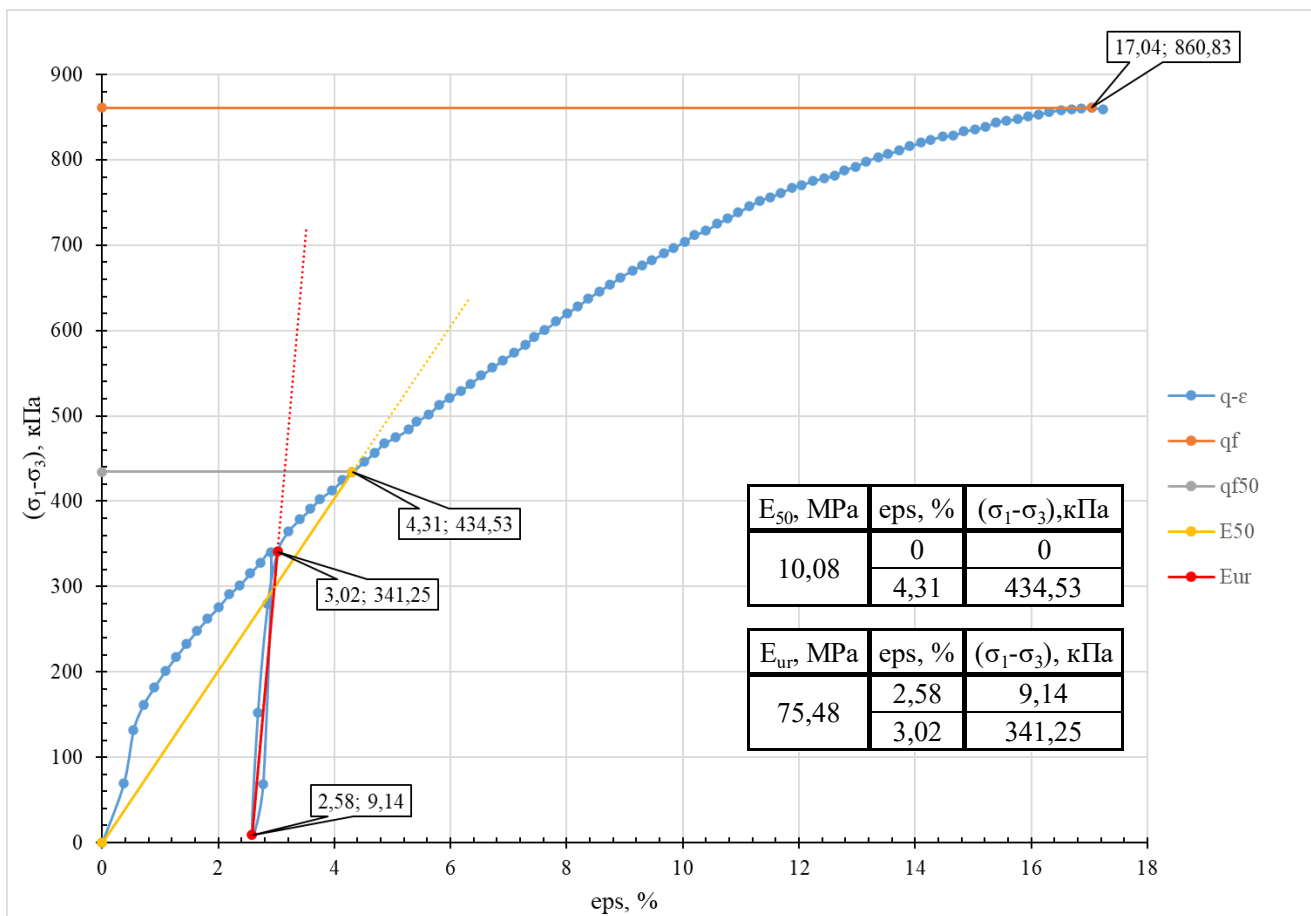


Рис. 8. Графік q-ε за даними з вісного випробування глини при $P_{ref}=300\text{кПа}$ (Sample 21).
 Fig. 8. The chart of q-ε according to the data of the triaxial test of clay at $P_{ref}=300\text{ kPa}$ (Sample 21)

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛІ HS У ВІРТУАЛЬНІЙ ЛАБОРАТОРІЇ SOILTEST В ПК PLAXIS

З метою ідентифікації параметрів моделі Hardening Soil в програмі Plaxis був створений ґрунт з вище визначеними параметрами (Рис. 9). Далі, використовуючи, SoilTest моделювалося випробування глини в приладі тривісного стиску. Графіки отримані у віртуальній

лабораторії значно відрізнялися від графіків отриманих під час реальних досліджень. Тому виникла необхідність варіювати певними параметрами моделі для підвищення збіжності (Рис. 10).

Максимальна осьова деформація зразка при опорному тиску $p_{ref}=300$ кПа згідно лабораторних досліджень склала 17,04 %, ці значення були використані під час моделювання випробувань в SoilTest.

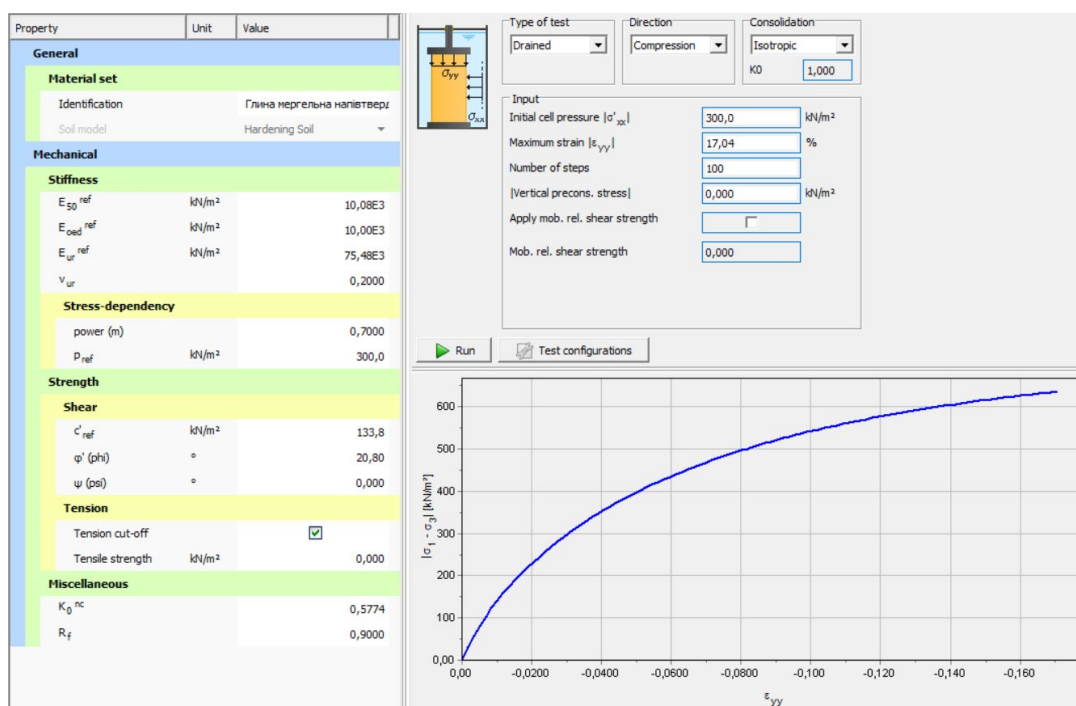


Рис. 9. Моделювання випробувань в приладі тривісного стиску в SoilTest.
Fig. 9. Modeling tests in the triaxial apparatus in SoilTest.

Name	Min value	Value	Max value	Units	Optimal	Sensitivity
E_{50}^{ref}	10,08E3	10,08E3	13,80E3	kN/m ²	13,68E3	65,9 %
E_{oed}^{ref}		10,00E3		kN/m ²	10,00E3	0,00 %
E_{ur}^{ref}		75,48E3		kN/m ²	75,48E3	0,00 %
v_{ur}	0,2000	0,2000	0,3000		0,2563	3,27 %
power (m)	0,5000	0,7000	0,8000		0,5158	7,32 %
p_{ref}		300,0		kN/m ²	300,0	0,00 %
c'_{ref}	130,0	133,8	133,8	kN/m ²	130,2	2,66 %
ϕ' (phi)	20,80	20,80	25,00	°	24,93	100 %
ψ (psi)		0,000		°	0,000	0,00 %
K_0^{nc}		0,5774			0,5774	0,00 %
R_f	0,7000	0,9000	0,9000		0,7090	32,0 %

Рис. 10. Ідентифіковані параметри моделі Hardening Soil.
Fig. 10. Identified parameters and their impact on optimization results.

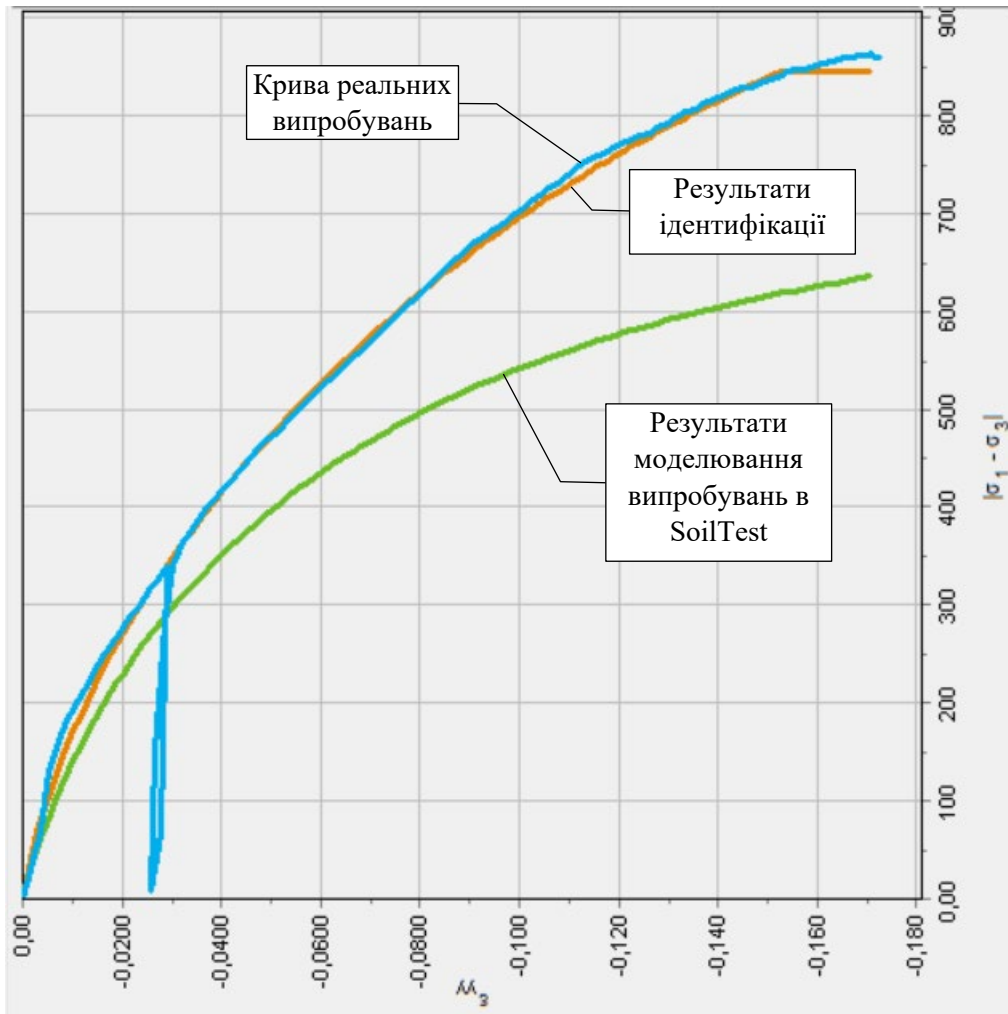


Рис. 9. Графік q - ϵ отриманий в результаті ідентифікації параметрів.
 Fig. 9. The q - ϵ chart is obtained as a result of parameter identification

ВИСНОВКИ

Представлено результати лабораторних випробувань зразків непорушеної структури глини напівтвердої «київський мергель» в приладі тривісного стиску та одометрі, які відібрані з глибини 50,5 м (абс. позначка 106,6 м) та 51,5 м (абс. позначка 105,6 м).

На основі лабораторних досліджень отримані фізичні і механічні характеристики ґрунту та відповідні залежності зміни деформаційних параметрів від рівня напружень, що представлені у вигляді графіків, по яким визначались наступні параметри моделі Hardening Soil:

E_{50}^{ref} – січний модуль деформації при стандартному консолидовано-дренованому випробуванні ґрунту на тривісний стиск;

E_{oed}^{ref} – дотичний модуль деформацій при первинному навантаженні в одометрі;
 E_{ur}^{ref} – модуль деформації ґрунту при розвантаженні/повторному навантаженні.

Приведено результати ідентифікації основних параметрів моделі Hardening Soil за допомогою віртуальної лабораторії SoilTest у ПК Plaxis, досягнуто відхилення результатів числового моделювання випробувань та даних фактичних лабораторних випробувань в межах 5%.

Встановлено, що найбільший вплив на збіжність результатів лабораторних випробувань та числового моделювання цих випробувань відіграють параметри моделі: коефіцієнт руйнування R_f та січний модуль жорсткості E_{50}^{ref} , їх чутливість у відсотках

відповідно складає 32% та 65,9%.

Уточненням міцнісних параметрів ґрунту значень ефективного питомого зчеплення c' та ефективного кута внутрішнього тертя ϕ' при випробуваннях у віртуальній лабораторії досягнуто ефект руйнування зразка при числовому моделювання.

Важливим чинником отримання коректних результатів лабораторних випробування є якісний відбір, транспортування, підготовка до випробування зразків ґрунту непорушеної структури та їх реконсолідація таким чином, щоб напружений стан під час лабораторних випробувань максимально відповідав природному стану, якщо цього не досягнуто то можна очікувати суттєвих помилок при визначенні характеристик.

ЛІТЕРАТУРА

1. Schanz, T. The hardening soil model: Formulation and verification / T. Schanz, P.A. Vermeer, P.G. Bonnier // *Beyond 2000 in Computational Geotechnics* №1 – 1999 – p. 281-296.
2. Obrzud r., Truty a., The hardening soil model - a practical guidebook, Technical Report Z Soil, PC 100701, Zace Services, Ltd., 2020.
3. Plaxis CONNECTION Edition V22.01. Material Models Manual. (2022).

REFERENCES

1. Schanz T., Vermeer P.A., Bonier P.G. (1999). The hardening soil model: Formulation and verification. *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*, 1, 281-296.
2. OBRZUD R., TRUTY A., The hardening soil model - a practical guidebook, Technical Report Z Soil, PC 100701, Zace Services, Ltd., 2020.
3. Plaxis CONNECTION Edition V22.01. Material Models Manual. (2022).

Identification of calculated parameters of the Hardening Soil model based on laboratory soil tests

Viktor Nosenko
Dmytro Nechyporenko
Fadeev Oleksiy

Summary. The modern soil model Hardening Soil, which is used in many software complexes intended for solving geotechnical problems, is considered. The model makes it possible to take into account changes in deformation parameters of soils depending on the level of applied stresses and to describe the deformation processes of cohesive soils under complex loading/unloading trajectories.

The paper also presents tables and graphs obtained during laboratory studies of semi-hard clay "Kyiv marl" in a triaxial system and an oedometer. Based on these data, the soil strength parameters c' and ϕ' , as well as the stiffens modules E_{50}^{ref} , E_{oed}^{ref} , E_{ur}^{ref} were determined.

To correlate the results of numerical simulation with the real behavior of clay soil in the Plaxis software complex, using the SoilTest virtual laboratory, a test in a triaxial compression device was simulated and soil parameters were identified. This approach makes it possible to increase the accuracy and quality of calculation results.

During identification, the parameters that most affect it were analyzed, which made it possible to better understand which parameters and in which ranges to vary in order to achieve the desired result.

It was determined that the most sensitive parameters are the section modulus of rigidity and the coefficient of destruction R_f . Their percentage sensitivity is 65.9% and 32%, respectively.

By varying the c' and ϕ' characteristics during the tests in the virtual laboratory, the destruction of the sample was simulated in accordance with real soil studies. Therefore, it is very important to correctly determine these parameters, because this can lead to an underestimation or, on the contrary, an overestimation of the strength of the soil base.

Keywords. Hardening Soil model, modulus of deformation, model parameters, laboratory tests, triaxial system, oedometer, parameter identification