

## Дослідження циклічної деградації ґрунтів

Юлія Коваленко, здобувач <sup>1</sup>i (ORCID: 0009-0002-2389-3975)

<sup>1</sup>Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

### АНОТАЦІЯ

У роботі розглядається поведінка ґрунтів, які під дією циклічних навантажень втрачають міцнісні та деформативні властивості, що має важливе значення для проєктування будівель і споруд різного призначення. Проаналізовано основні механізми зниження характеристик міцності ґрунтів при повторних навантаженнях, а також їх вплив на деформаційні характеристики. Розглянуто сучасні підходи до моделювання зміни показників ґрунтів при дії циклічного навантаження: Active-Direct shear-Passive concept (NGI-ADP), visco-hypoplasticity. Окрему увагу приділено методам експериментального визначення зміни показників ґрунтів та чисельному моделюванню поведінки ґрунтів при дії циклічного навантаження. Отримані результати дозволяють підвищити точність прогнозування величин деформацій і забезпечити безпечне та економічно ефективно проєктування будівель та споруд.

**Ключові слова:** міцність, деформації, показники ґрунтів, циклічне навантаження, пластичне руйнування, NGI-ADP, visco-hypoplasticity.

### 1. ВСТУП

Циклічні навантаження від дії вітру, сейсміки, обладнання, вибуху, природних та техногенних процесів, що діють на конструкції будівель та споруд відіграють важливу роль у забезпеченні їх довговічності та безпеки. Під дією таких навантажень на конструкції, ґрунт, що знаходиться під подошвою фундаментів також зазнає змін – відбувається зниження міцнісних та деформаційних показників, що призводить до появи додаткових деформацій і, як наслідок, руйнування конструкцій. Деградація відбувається за принципом відповідним кожному типу ґрунту: для пісків характерна при циклічному навантаженні ліквідація (розрідження основи в умовах слабого дренажу), а також роздрібнення часточок. Для глинистих ґрунтів характерне руйнування структури, розриви мікрозв'язків. Органічні ґрунти в залежності від виду поведуть себе як піски (мул) чи глини (торфи, волокнисті ґрунти).

Для моделювання зниження характеристик ґрунтів при дії циклічного навантаження застосовуються різні підходи в залежності від необхідної точності та складності аналізу. **Модель NGI-ADP** (Norwegian Geotechnical Institute Advanced Duncan-Park) орієнтована на відтворення **циклічного зниження міцності та жорсткості** ґрунтової основи. Вона дозволяє поетапно змінювати параметри матеріалу після кожного циклу навантаження, що забезпечує просте та ефективно відтворення втрати несучої здатності ґрунту у чисельних розрахунках. Тому NGI-ADP широко застосовується в інженерній практиці для **розрахунку основ при повторних циклічних впливах**, коли головною метою є оцінка зменшення міцності ґрунту.

На відміну від цього, **Visco-Hypoplastic** додає **часозалежну складову**, що дозволяє змоделювати **накопичення пластичних деформацій та релаксацію напружень** у ґрунті. Така модель є більш універсальною та точною для дослідження поведінки ґрунтів під тривалим циклічним навантаженням, зокрема коли важлива залежність деформацій від швидкості або тривалості впливу. Вона застосовується, наприклад, для прогнозування поведінки ґрунту у сейсмічних умовах, під довготривалими технологічними навантаженнями або при моделюванні

складних інженерних споруд, де важливе відтворення не тільки втрати міцності, а й накопичення деформацій у часі. Таким чином, вибір моделі залежить від мети аналізу: **NGI-ADP** краще підходить для інженерних розрахунків із циклічним зниженням міцності, тоді як **Visco-Hypoplastic** дозволяє більш точно враховувати розвиток деформацій в часі і поведінку ґрунту під тривалим циклічним навантаженням.

### 2. NGI-ADP

Для визначення параметрів моделі NGI-ADP використовуються результати лабораторних випробувань ґрунтів у трьох класичних схемах навантаження: прямому зсуві (DSS), триаксальному стиску (TXC) та триаксальному розтягу (TXE). Обрані комбінації випробувань дозволяють оцінити поведінку ґрунту як при зсувних, так і при об'ємних деформаціях, що є важливим для більш якісного та точного налаштування моделі NGI-ADP.

Кожне випробування виконується не менше трьох разів. При цьому криві залежності між «напруженнями та деформаціями» характеризуються усередненими значеннями. Отримані експериментальні криві після різної кількості еквівалентних циклів ( $N_{eq}$ ) приймаються для калібрування моделі. Такий підхід забезпечує відтворення реальної поведінки ґрунту при циклічному навантаженні та дозволяє врахувати зниження його міцності у розрахунках при числовому моделюванні.

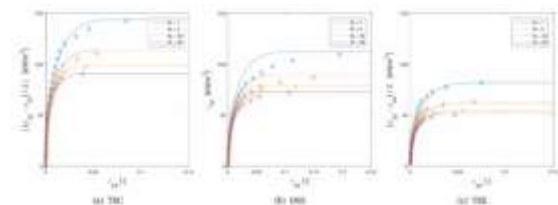


Рисунок 1. Графіки залежності між напруженнями та деформаціями при прямому (а), триаксальному стиску (б) та розтягуючому (в) зсуві [1]

Підібрані параметри (табл. 2) демонструють чітку тенденцію зменшення недренованої міцності ґрунту у активному руйнуванні ( $S_{u}^A$ ) зі зростанням  $N_{eq}$ .

Так після 5 циклів випробувань величина  $S_u^A$  зменшується до 79.1% від початкового рівня, після 10 циклів — до 68.7%, а після 20 циклів — до 63.1%. Це означає, що у порівнянні зі станом після першого циклу випробувань ґрунт втрачає майже 40% своєї несучої здатності. Подібний результат спостерігається і при узагальненому аналізі: при зростанні  $N_{eq}$  від 1 до 20 активна недренована міцність знижується приблизно на 26% ( $\approx 35$  кПа).

$N_{eq}$	$G/S_u^A$	$S_u^E$	$S_u^E/S_u^A$	$S_u^{E0}/S_u^A$	$\gamma^{E0}$	$\gamma^{E1}$	$\gamma^{E2}$	$\gamma_0/S_u^E$	$K_0$
[1]	[1]	[MPa]	[1]	[1]	[%]	[%]	[%]	[1]	[1]
1	300	144.8	0.57	0.77	10.0	10.0	10.0	0.0	1.00
5	300	114.5	0.55	0.78	8.0	8.0	8.0	0.0	1.00
10	300	99.5	0.55	0.79	6.0	6.0	6.0	0.0	1.00
20	300	91.3	0.58	0.80	5.5	5.5	5.5	0.0	1.00

Таблиця 1. Оптимізовані параметри NGI-ADP [1]

Важливо підкреслити, що анізотропія міцності при цьому залишається сталою. Співвідношення між міцністю у триаксальному розтягу та активному руйнуванні ( $S_u^E/S_u^A$ ) знаходиться у діапазоні 0.55–0.58 незалежно від кількості циклів. Це свідчить про те, що циклічне навантаження впливає на абсолютний рівень міцності, тоді як форма поверхні руйнування та співвідношення міцності у різних режимах деформування залишаються відносно незмінними.

Таким чином, результати натурних випробувань у поєднанні з числовим моделюванням NGI-ADP підтверджують, що основним ефектом циклічної втоми є поступова втрата міцності, тоді як анізотропні властивості залишаються незмінними.

### 3. VISCO-HYUROPLASTIC

Для більш точного моделювання зниження характеристик глинистих ґрунтів під дією циклічного навантаження широко застосовуються нелінійні гіпопластичні моделі, серед яких особливої уваги заслуговує Visco-Huroplastic.

Ця модель дозволяє враховувати зміни жорсткості та накопичення деформацій ґрунту як функцію числа циклів, величини напружень, пористості та тиску пор:

$$\varepsilon'_{ij} = f(\sigma_{ij}, p, N, e),$$

де  $\varepsilon'_{ij}$  - швидкість деформації,  $\sigma_{ij}$  - тензор напружень,  $p$  - тиск пор,  $e$  - пористість,  $N$  - число циклів навантаження.

Особливістю Visco-Huroplastic моделі є можливість відтворення в'язкопластичної складової поведінки ґрунту, що забезпечує більш реальний опис процесів зниження жорсткості та накопичення пластичних деформацій під тривалим циклічним навантаженням. Такий підхід дозволяє ефективно моделювати роботу ґрунтової основи в умовах багаторазового повторного впливу навантажень, що є важливим для оцінки надійності інженерних конструкцій.

### 4. ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ

Для чисельного моделювання зниження характеристик ґрунтів при дії циклічного навантаження використовуються як стандартні, так і наукові програмні комплекси. Модель NGI-ADP широко реалізована у комерційних геотехнічних

програмах, таких як PLAXIS 2D/3D, що дозволяє моделювати циклічне зниження міцності та жорсткості ґрунтової основи при виконанні інженерних розрахунків фундаментів, дамб та інших конструкцій.

Модель Visco-Huroplastic, яка включає часову залежність деформацій та релаксацію напружень, зазвичай не представлена у стандартних комерційних пакетах і реалізується у наукових або спеціалізованих програмних комплексах, а також у FEM-середовищах (наприклад, ABAQUS, FLAC3D) через користувацькі підпрограми для визначення матеріальних властивостей (UMAT/VUMAT).

Такий підхід дозволяє моделювати поступове накопичення пластичних деформацій, ефект залежності від швидкості циклічного навантаження та тривалість релаксації напружень, що особливо важливо для прогнозування поведінки фундаментів споруд під тривалими або багаторазовими навантаженнями.

Таким чином, вибір програмного комплексу та конкретної моделі ґрунтової основи залежить від мети дослідження: NGI-ADP забезпечує практичну та ефективну інженерну оцінку циклічної втоми, тоді як Visco-Huroplastic застосовується переважно у наукових роботах для точного моделювання часових ефектів та накопичення деформацій.

### 5. ВИСНОВОК

Циклічні навантаження призводять до поступового зниження міцності та деформативності ґрунтів, при цьому зберігається стабільність анізотропних властивостей. Калібрування моделі NGI-ADP на основі даних, отриманих після проведення лабораторних досліджень дозволяє більш точно відтворювати втрату несучої здатності під повторними навантаженнями, що є критично важливим для інженерних розрахунків фундаментів будівель та споруд.

Модель Visco-Huroplastic, у свою чергу, забезпечує можливість врахування розвитку деформацій в часі та накопичення пластичних зрушень, що робить її ефективною для наукового прогнозування поведінки ґрунтів під тривалими або багаторазовими циклічними впливами.

Використання обох підходів у поєднанні з чисельними методами підвищує надійність проектування та дозволяє оптимізувати інженерні рішення.

### Список літератури

- [1] Rasch, C. (2016). Modelling of cyclic soil degradation: Development of a cyclic accumulation model and the application to a gravity based foundation. [Delft University of Technology]
- [2] Allotey, N., & El Naggar, M. H. (2006). Cyclic soil degradation/hardening models: A critique / Dégradation/durcissement de sol modèles cycliques: Une critique. *Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Millpress Science Publishers / IOS Press. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-656-9-785>

<sup>i</sup> Робота виконана під керівництвом, доц., канд. техн. наук, доц. кафедри геотехніки Олега Малишева