

УДК 624.213+624.131

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270425.126.1152

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА АВТОМОБІЛЬНОЇ ДОРОГИ В ПРОЦЕСІ СПОРУДЖЕННЯ НА СЛАБКИХ ҐРУНТАХ

ТРЕГУБ О. В.^{1*}, канд. техн. наук, доц.,
КОВАЛЬОВ В. В.², докт. техн. наук, доц.,
ЛАНДО Є. О.³, канд. техн. наук, доц.,
КОЧАН С. М.⁴, ас.,
АНДРЕЄВА І. Г.⁵, ас.

^{1*} Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: tregub.olexandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-6436-352X

² Кафедра інженерної геології і геотехніки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: kovalov.viacheslav@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-6731-4192

³ Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: lando.evgen@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-2608-931X

⁴ Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: kochan.sergii@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-9099-0399

⁵ Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: andreieva.iiryna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7083-8955

Анотація. *Постановка проблеми.* Забезпечення несучої здатності основ є актуальною проблемою при будівництві автомобільних доріг та штучних споруд на слабких ґрунтах. Метод попереднього привантаження основи забезпечує зміцнення слабких ґрунтів. Однак методика розрахунку та проектування земляного полотна з урахуванням особливостей взаємодії з ґрунтовою основою у процесі спорудження потребує удосконалення. *Метою досліджень* є удосконалення методики чисельного моделювання методом скінченних елементів (МСЕ) напружено-деформованого стану (НДС) земляного полотна автомобільних доріг у процесі спорудження на слабких ґрунтах з урахуванням їх попереднього обтиснення. *Результати досліджень.* Достовірність моделей ґрунтів оцінена тестовим чисельним моделюванням натурних випробувань основ дослідними фундаментами за ідеальною пружно-пластичною моделлю з критерієм міцності Мора-Кулона (Mohr-Coulomb model) та моделлю ізотропного зміцнення (Hardening Soil model) з використанням програми PLAXIS 3D. У роботі розглядалися задачі моделювання НДС при навантаженні та частковому розвантаженні (ефект попереднього обтиснення) шару слабого ґрунту у процесі спорудження земляного полотна автодороги; визначення часу стабілізації осідань; моделювання НДС при ущільненні слабого ґрунту з вертикальними піщаними дренами і фільтраційним шаром; моделювання земляного полотна на піщаній подушці. За даними чисельного моделювання визначені розміри зон зміцнення і пластичних деформацій у основі та допустимий тиск для забезпечення зміцнення ґрунту. Час консолідації ґрунту та стабілізації осідань основи розраховувався за даними розсіювання надлишкового порового тиску у шарі слабого водонасиченого ґрунту. Стійкість укосів земляного полотна перевірялась розрахунком «коефіцієнтів безпеки». *Висновки.* Для моделювання МСЕ НДС основ при навантаженні та частковому розвантаженні (ефект попереднього обтиснення) шару слабого ґрунту у процесі спорудження земляного полотна автодороги є доцільним використання пружно-пластичної моделі ізотропного зміцнення. Застосування методу привантаження фільтруючим насипом з улаштуванням вертикальних дрена забезпечить зміцнення слабких ґрунтів та підвищення несучої здатності основи у короткі терміни, що дозволить експлуатувати автодорогу без значних додаткових деформацій, тим самим підвищити її надійність в експлуатації. Розглянута методика чисельного моделювання МСЕ НДС може бути використана при проектуванні споруд на слабких ґрунтах, що передбачає розрахунки осідань і напружень, надлишкового порового тиску, часу консолідації, аналіз зон пластичних деформацій, зміцнення ґрунту і стійкості.

Ключові слова: чисельне моделювання; слабкі ґрунти; земляне полотно; попереднє обтиснення ґрунтів; автомобільна дорога

NUMERICAL MODELING OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE ROAD EMBANKMENT DURING CONSTRUCTION ON SOFT SOILS

TREGUB O.V.^{1*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
KOVALOV V.V.², *Dr. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
LANDO Yev.O.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
KOCHAN S.M.⁴, *Ass.*,
ANDREIEVA I.G.⁵, *Ass.*

^{1*} Department of Highways, Geodesy and Land Management, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: tregub.olexandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-6436-352X

² Department of Engineering Geology and Geotechnics, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: kovalov.viacheslav@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-6731-4192

³ Department of Highways, Geodesy and Land Management, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: lando.evgen@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-2608-931X

⁴ Department of Highways, Geodesy and Land Management, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: kochan.sergii@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-9099-0399

⁵ Department of Highways, Geodesy and Land Management, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: andreieva.iryana@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7083-8955

Abstract. Problem statement. Ensuring the bearing capacity of bases is a pressing issue in the construction of roads and artificial structures on soft soils. The method of preloading the base ensures the strengthening of soft soils. However, the calculation and design methodology for the roadbed, taking into account the specific features of its interaction with the soil base during construction, requires improvement. The **purpose of the research** is to improve the methodology of numerical modeling using the finite element method (FEM) for the stress-strain state (SSS) of road embankments during construction on soft soils, taking into account their precompression. **Research Results.** The reliability of soil models was assessed through test numerical modeling of field tests on foundations using the ideal elastic-plastic model with the Mohr-Coulomb strength criterion and the Hardening Soil model, utilizing the PLAXIS 3D software. The study considered tasks such as modeling the stress-strain state (SSS) during loading and partial unloading (precompression effect) of a soft soil layer during the construction of a road embankment, determining the time required for settlement stabilization, modeling the SSS during the compaction of soft soil with vertical sand drains and a filtration layer, and modeling the embankment on a sand cushion. Based on the numerical modeling results, the dimensions of the strengthening and plastic deformation zones in the base and the allowable pressure for soil improvement were determined. The consolidation time of the soil and settlement stabilization of the foundation were calculated based on the dissipation of excess pore pressure in the soft water-saturated soil layer. The stability of the embankment slopes was checked by calculating the "safety factors". **Conclusions.** For modeling the FEM SSS of foundations under loading and partial unloading (precompression effect) of a soft soil layer during the construction of a road embankment, the use of an elastic-plastic isotropic hardening model is advisable. The application of the preload method using a filtering embankment with vertical drains will strengthen the soft soils and increase the bearing capacity of the foundation in a short period, allowing the road to be used without significant additional deformations, thus enhancing its reliability during operation. The proposed method of numerical modeling FEM SSS can be applied in the design of structures on soft soils, which involves the calculation of settlements and stresses, excess pore pressure, consolidation time, analysis of plastic deformation zones, soil strengthening and stability.

Keywords: numerical modeling; soft soils; road embankment; precompression of soils; highway

Постановка проблеми. Забезпечення несучої здатності основ є актуальною проблемою при будівництві автомобільних доріг та штучних споруд на слабких ґрунтах. Слабкі ґрунти характеризуються високою стисливістю, що зумовлена

значенням модуля загальної деформації $E < 5 \text{ МПа}$ та коефіцієнтом водонасичення $S_r \geq 0,8$. До таких ґрунтів належать водонасичені мулисті супіски, суглинки, глини, сапропелі, торфи, заторфовані і лесові насичені водою ґрунти та ін. [1].

Як правило, проектне рішення на ділянці залягання слабких ґрунтів передбачає: видалення та заміну шару слабого ґрунту; спорудження естакад; використання слабого ґрунту у якості основи із застосуванням заходів, що забезпечують ущільнення і зміцнення та прискорення процесу консолідації ґрунтів.

Проектні рішення приймають на основі техніко-економічного порівняння варіантів з урахуванням: категорії автомобільної дороги; необхідної висоти земляного полотна; особливостей будови слабкої ґрунтової товщі; умов виконання робіт й термінів завершення будівництва та ін.

З метою підвищення несучої здатності та зменшення деформативності слабких ґрунтів застосовують метод передбудівельного ущільнення основ поверхневим привантаженням, проєктування якого передбачає визначення розмірів шару насипу й часу необхідного для досягнення заданого ступеню консолідації ґрунтів.

Використання слабого ґрунту у якості основи без його заміни подушкою суттєво знижує вартість та трудомісткість робіт, підвищує темпи будівництва. Однак необхідно враховувати стійкість, кінцеві величини та час стабілізації осідання слабкої ґрунтової товщі при спорудженні на ній земляного полотна автодороги.

Важливим завданням є удосконалення методики чисельного моделювання, визначення моделей ґрунтів здатних розраховувати НДС при вирішенні вказаних задач з урахуванням процесів консолідації, часу стабілізації осідань та ін.

Виділення невідомої проблеми.

У практиці будівництва для покращення фізико-механічних властивостей ґрунтів використовують наступні технології: глибинне ущільнення ґрунтовими палями, поверхнєве ущільнення важкими трамбівками, заміна слабого шару подушкою, армування, цементация, силікатизация, попереднє (передбудівельне) ущільнення тощо. Метод передбудівельного ущільнення основи фільтруючим поверхневим привантаженням не вимагає

значних витрат у порівнянні з вище зазначеними методами. У процесі привантаження відбувається усестороннє обтиснення ґрунту, що сприяє витисканню води із пор і ущільненню ґрунту. Але при швидкому навантаженні без урахування консолідації відбуваються зрушення та витискання шару слабого ґрунту із-під основи споруди. Невідомою є величина попереднього привантаження, що необхідне для достатнього ущільнення і зміцнення ґрунту. Необхідна методика визначення допустимого тиску при попередньому обтисненні слабкої основи.

Аналітичні методи дозволяють визначити осідання при первинному завантаженні [1; 2; 9]. Такі розрахунки завищують пружні деформації і не враховують осідання попередніх стадій навантаження основи. Чисельне моделювання методом скінченних елементів (МСЕ) дає можливість виконувати розрахунки з урахуванням впливу попередніх стадій навантаження на подальші деформації основи [11].

Методом скінченних елементів виконують розрахунки деформацій слабких ґрунтів та часу їх стабілізації з використанням моделей, що враховують первинну та вторинну консолідацію, повзучість ґрунтів. У програмному комплексі PLAXIS є можливим моделювання: вихідного природного напружено-деформованого стану (НДС) основи, попереднього привантаження ґрунтових шарів, розвантаження і прикладення навантажень від споруди та ін.

Моделі ґрунтів враховують пружно-пластичні, пружно-в'язко-пластичні деформації, однак їх використання у практиці проєктування все ще стримується у зв'язку із труднощами визначення розрахункових параметрів.

Мета досліджень – удосконалення методики чисельного моделювання МСЕ НДС земляного полотна автомобільної дороги у процесі спорудження на слабких ґрунтах; визначення допустимого тиску при попередньому обтисненні слабкої основи; оцінка адекватності моделей ґрунту при

визначенні НДС основи споруди з урахуванням попереднього тимчасового привантаження задля ущільнення та зміцнення ґрунту.

Аналіз досліджень і публікацій.

Питанням розрахунків та проєктуванню споруд на слабких ґрунтах присвячені дослідження вітчизняних та закордонних науковців: І. П. Бойко, Ю. Л. Винников, М. Ф. Друкований, М. Л. Зоценко, С. М. Клепиков, М. В. Корнієнко, В. І. Крисан, Ю. О. Кірічек, В. О. Сахаров, О. В. Самородов, В. Л. Сєдін, Ю. Ф. Тугаєнко, В. Б. Швець, В. С. Шокарєв, Braja M. D., Khaled Sobhan, T. Schanz, P. A. Vermeer та ін. [3–8; 10; 11].

Згідно з ДСТУ [2] рекомендується ущільнення слабких ґрунтів тимчасовим чи постійним привантаженням насипним ґрунтом, у тому числі із улаштуванням фільтруючого шару чи дрени за необхідності прискорення процесу консолідації основи. У якості альтернативного рішення слід розглядати заміну шарів слабких ґрунтів на піщані, гравійні та ін. подушки.

Бража М. Д. зазначає [8], що для зменшення деформативності слабких ґрунтів є ефективним їх передбудівельне тимчасове привантаження. Враховується тиск від споруди $\Delta\sigma_{(p)}$ та додаткове навантаження $\Delta\sigma_{(f)}$ шару слабого ґрунту. Осідання слабого шару ґрунту потужністю H за рахунок первинної фільтраційної консолідації при навантаженні $\Delta\sigma_{(p)} + \Delta\sigma_{(f)}$ визначається за формулою [8]:

$$S_{(p+f)} = \frac{c_v H}{1+e_0} \log \frac{\sigma'_0 + [\Delta\sigma_{(p)} + \Delta\sigma_{(f)}]}{\sigma'_0}.$$

Ступінь консолідації визначається за виразом:

$$U = \frac{\log \left[\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma_{(p)}}{\sigma'_0} \right]}{\log \left[\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma_{(p)} + \Delta\sigma_{(f)}}{\sigma'_0} \right]}.$$

Метод ущільнення слабких водонасичених ґрунтів до початку будівництва є доцільним при стисливих основах потужністю понад 3 м. Кінцеве

осідання шару ґрунту потужністю H під дією рівномірно розподіленого навантаження P_I від ваги насипу висотою h визначається за формулою [2]:

$$S = H m_v p_{II},$$

де m_v – коефіцієнт відносної стисливості ґрунту слабого шару, кПа^{-1} ; p_{II} – тиск від ваги насипу.

Осідання шару ґрунту кінцевої товщини S_t у момент часу t визначається за формулою:

$$S_t = SQ,$$

де S – кінцеве осідання шару слабого ґрунту, см; Q – ступінь консолідації (ущільнення) шару слабого ґрунту.

Відповідно до теорії ступінь фільтраційної консолідації Q пов'язаний зі значенням N :

$$N = \pi^2 c_v t / (4h^2).$$

Звідси час:

$$t = 4h^2 N / (\pi^2 c_v),$$

де c_v – коефіцієнт консолідації:

$$c_v = k_f / (m_v \gamma_w),$$

де k_f – коефіцієнт фільтрації ґрунту см/рік; γ_w – питома вага води.

Для одомірної задачі ущільнення епюра напружень, що ущільнює основу приймається у вигляді прямокутника.

При призначенні тиску на основу складену слабкими ґрунтами та швидкості його прикладення рекомендується враховувати величини їх структурної міцності [2].

Для моделювання НДС у процесі спорудження земляного полотна з урахуванням попереднього обтиснення основи складеної слабкими ґрунтами (консолідації та зміцнення) є ефективним використання геотехнічного програмного комплексу PLAXIS [10; 11].

Оцінювання достовірності моделей ґрунтів. Для оцінювання достовірності моделей ґрунтів щодо прогнозування

осідань проведені тестові чисельні моделювання МСЕ у програмі PLAXIS 3D натурних випробувань ґрунтової основи.

При чисельному моделюванні використані ідеальна пружно-пластична модель ґрунту з критерієм міцності Мора-Кулона (*Mouhr-Coulumn – далі скор. МС*) та модель зміцнення ґрунту (*Hardening Soil, далі скор. – HS*).

Вихідними параметрами до моделі МС є фізико-механічні характеристики ґрунтів, які визначають стандартними методами випробування.

Для моделювання НДС за моделлю HS використовують характеристики жорсткості ґрунту: модуль деформації E_{50}^{ref} , який визначають для 50% рівня навантаження від граничного; E_{oed}^{ref} – компресійний модуль при навантаженні; E_{ur}^{ref} – модуль при розвантаженні; m – показник ступеневої залежності жорсткості ґрунту від рівня напружень. На відміну від моделі МС, модель зміцнення ґрунту HS урахує залежність модулів жорсткості від напруження. Усі модулі жорсткості зростають із тиском.

На першому етапі розрахунку за моделлю HS прийняті модулі ґрунту, що розраховані у програмі зі співвідношень:

$$E_{50}^{ref} = E_{oed}^{ref}, E_{ur}^{ref} = 3 \cdot E_{50}^{ref} \quad (1)$$

На другому етапі розрахунку з метою спроби підвищити точність прогнозування осідання за моделлю HS використано компресійний модуль деформацій, який розраховано за формулою:

$$E_{oed} = \frac{(1-\nu)E}{(1-2\nu)(1+\nu)}, \quad (2)$$

де E – штамповий модуль деформації, ν – коефіцієнт Пуассона ґрунту.

1) Для першого тестового чисельного моделювання вхідні дані прийняті за результатами випробувань основи дослідним фундаментом розмірами у плані $1,4 \times 1,6$ м при складному режимі навантаження [6]. Ґрунт – суглинок з наступними фізико-механічними характеристиками: питома вага $\gamma = 18,7$ кН/м³; коефіцієнт пористості

$e = 0,75$; кут внутрішнього тертя $\varphi = 23^\circ$; питоме зчеплення $c = 43$ кН/м². За графіком осідання визначено модуль деформації основи $E = 19$ МПа. Граничний опір основи $P_u = 1,09$ МПа. $E_{50}^{ref} = E_{oed}^{ref} = 19$ МПа, $E_{ur}^{ref} = 3 \cdot E_{50}^{ref} = 57$ МПа.

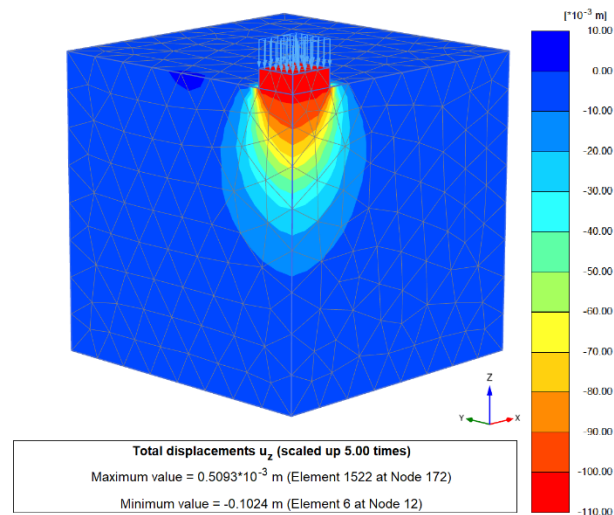


Рис. 1. Чисельне моделювання осідання дослідного фундаменту на основі із суглинку

У результаті зіставлення чисельного розрахунку осідань з даними випробування ґрунту дослідним фундаментом визначене наступне. При навантаженнях, що перевищують пружну стадію (приблизно лінійний діапазон у залежності $S-P$) роботи ґрунту за обома моделями зафіксовані зниження модулів деформації та розвиток пластичних деформацій в основі. За моделлю HS отримані дещо більші значення розрахункових осідань фундаменту у порівнянні з натурними даними (розбіжність 5–56 %) та менші значення осідань – за моделлю МС (розбіжність 22–37 %). При розвантаженні ґрунту модель МС показала значно завищені значення пружних (відновлюваних) деформацій – відхилення до 80 %. Втрата несучої здатності основи – при тиску 0,82 МПа.

Результати чисельного моделювання з використанням модулів жорсткості ґрунту за співвідношенням (1) продемонстрували незадовільну збіжність розрахункових і експериментальних значень осідань фундаменту. Уточненим розрахунком за моделлю HS з використанням модуля E_{oed} ,

що визначений за рівнянням (2) ($E_{oed}^{ref} = 30,5$ МПа), це забезпечило збіжність значень за гілкою навантаження (до 12 %) у діапазоні до $0,75 P_u$ (див. крива № 4 HS-2 на рис. 2). За гілкою розвантаження модель HS показала задовільну збіжність. Рекомендується приймати модулі жорсткості за результатами випробувань ґрунту методами компресійного та тривісного стискання.

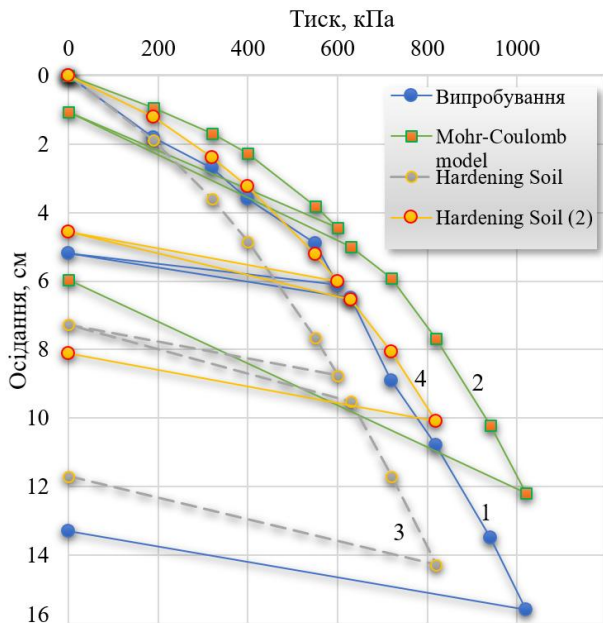


Рис. 2. Зіставлення результатів чисельного розрахунку осідань з випробуваннями дослідним фундаментом основи із суглинку

2) Для другого тестового чисельного моделювання використано результати випробувань основи дослідним фундаментом з розмірами у плані $1,0 \times 1,0$ м, глибиною закладання $d = 0,8$ м. Досліди проведені під керівництвом проф. Ю. Ф. Тугаєнко. Ґрунт – глина з наступними фізико-механічними характеристиками: $\varphi = 14,8^\circ$; $c = 38$ кПа; $E = 4,8$ МПа; $\gamma = 17,95$ кН/м³; $e = 1,0$ [7].

У результаті зіставлення чисельного розрахунку за моделлю HS отримані більші значення прогнозованих осідань основи у порівнянні з натурними даними (розбіжність 17–51 %) та менші значення осідань – за моделлю MC (розбіжність 3–41 %).

До переваг пружно-пластичної моделі слід віднести використання стандартних механічних параметрів ґрунтів. Однак ця

модель не враховує зміцнення ґрунту при навантаженні, а при розвантаженні пружні деформації, як правило, значно перевищують натурні дані. Для моделювання НДС основ при їх попередньому обтисненні є доцільним використання моделі HS.

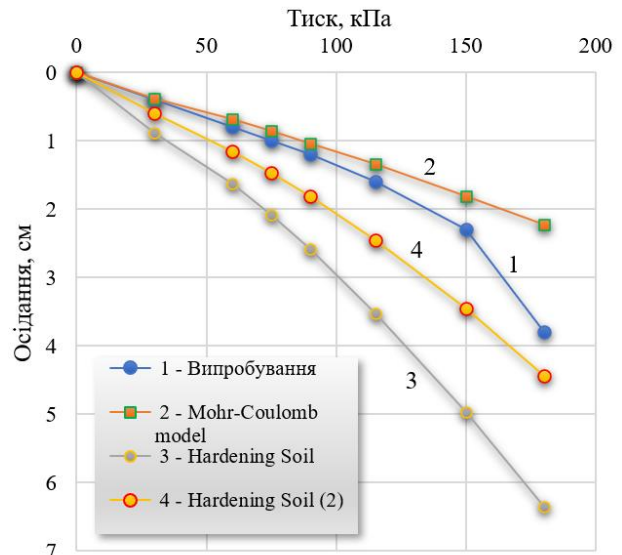


Рис. 3. Зіставлення результатів чисельного моделювання осідань з випробуваннями дослідним фундаментом основи із глини

Чисельне моделювання НДС земляного полотна автомобільної дороги у процесі спорудження на слабких ґрунтах. Для вирішення поставленого завдання і з метою пошуку альтернативних рішень у роботі виконане чисельне моделювання МСЕ НДС земляного полотна автомобільної дороги у процесі спорудження на слабких ґрунтах з використанням програмного комплексу PLAXIS за моделями MC та HS.

У дослідженні розглянуті наступні задачі:

- моделювання НДС основи при навантаженні та частковому розвантаженні (ефект передбудівельного обтиснення) шару слабого ґрунту у процесі спорудження земляного полотна автодороги; визначення часу стабілізації осідань;

- моделювання НДС основи при ущільненні шару слабого ґрунту з вертикальними піщаними дренами, що об'єднані по верху фільтраційним шаром, у

процесі спорудження земляного полотна;
визначення часу стабілізації осідань;

- моделювання НДС при спорудженні земляного полотна на піщаній подушці, улаштованій шляхом часткової заміни шару слабого ґрунту.



Рис. 4. BIM-модель автомобільної дороги Іб категорії

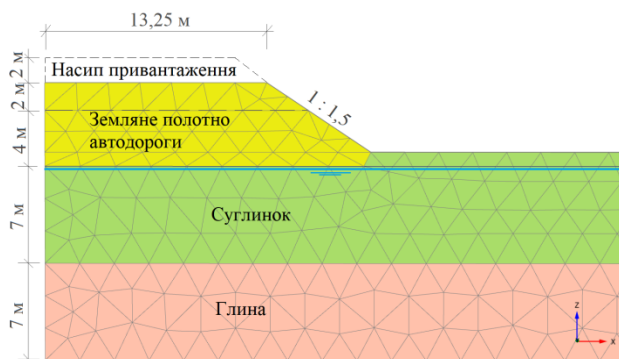


Рис. 5. Розрахункова модель МСЕ

Виконане моделювання земляного полотна автомобільної дороги Іб технічної категорії (рис. 4), що споруджується із супіску на слабкому ґрунті – водонасичений суглинок текучопластичної консистенції потужністю 7,0 м, який підстиляється шаром м'якопластичної глини (рис. 5).

Нижня частина насипу $h = 0,5$ м моделюється із добре фільтруючого матеріалу ($k = 1,0$ м/добу). Рівень ґрунтових вод – на 1 м нижче поверхні.

У результаті чисельного моделювання МСЕ визначені НДС земляного полотна, час консолідації шару слабого ґрунту, області пластичних деформацій та зміцнення ґрунту, допустимі тиски, стійкість укосів за коефіцієнтом безпеки.

Розрахунок за ідеальною пружно-пластичною моделлю з критерієм міцності Мора-Кулона.

Використання ідеальної пружно-пластичної моделі з критерієм міцності Мора-Кулона за умови недренованої поведінки ґрунту з певним припущенням дозволяє урахувати первинну фільтраційну консолідацію, за якої відбувається найбільший розвиток осідань у часі.

Моделювання спорудження земляного полотна автомобільної дороги на слабкому ґрунті з урахуванням попереднього тимчасового привантаження включало наступні етапи:

- зведення земляного полотна висотою 4,0 м на слабкому ґрунті упродовж 20 діб;
- технологічна перерва (витримування привантаження) – 30 діб;
- відсіпання земляного полотна висотою 2 м та тимчасового насипу привантаження – 2 м, упродовж 10 діб;
- витримування попереднього привантаження задля консолідації ґрунту, що визначається за умовою розсіювання надлишкового порового тиску у шарі слабого ґрунту до значення 20 кПа;
- часткове розвантаження основи – видалення насипу привантаження висотою 2,0 м.

У програмі PLAXIS виконане моделювання ґрунтової основи та насипу, введені параметри ґрунтів (табл. 1), граничні умови, стадії будівництва, згенерована сітка скінченних елементів.

Шари суглинку та глини є недренованими, що призведе до зростання надлишкового порового тиску під час спорудження насипу. Час необхідний на стабілізацію осідань розраховувався із умови розсіювання надлишкового порового тиску у ґрунті до значення 20 кПа.

Таблиця 1

Основні параметри до розрахунку основи за ідеальною пружно-пластичною моделлю з критерієм міцності Мора-Кулона

Параметри	Супісок	Суглинок	Глина
Модель ґрунту	Mohr-Coulumb		
Тип поведінки	Дрен.	Не дрен.	Не дрен.
Питома вага ґрунту, γ_{unsat} , кН/м ³	17,4	15,5	16,5
Питома вага водонасиченого ґрунту, γ_{sat} , кН/м ³	19,6	17,6	18,5
Коефіцієнт фільтрації, k , м/добу	0,5	$3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
Модуль деформації, E_{ref} , кН/м ²	28 000	5 000	17 500
Коефіцієнт Пуассона, ν	0,3	0,35	0,35
Питоме зчеплення, c_{ref} , кН/м ²	13	12	35
Кут внутрішнього тертя, ϕ , град.	25	22	20

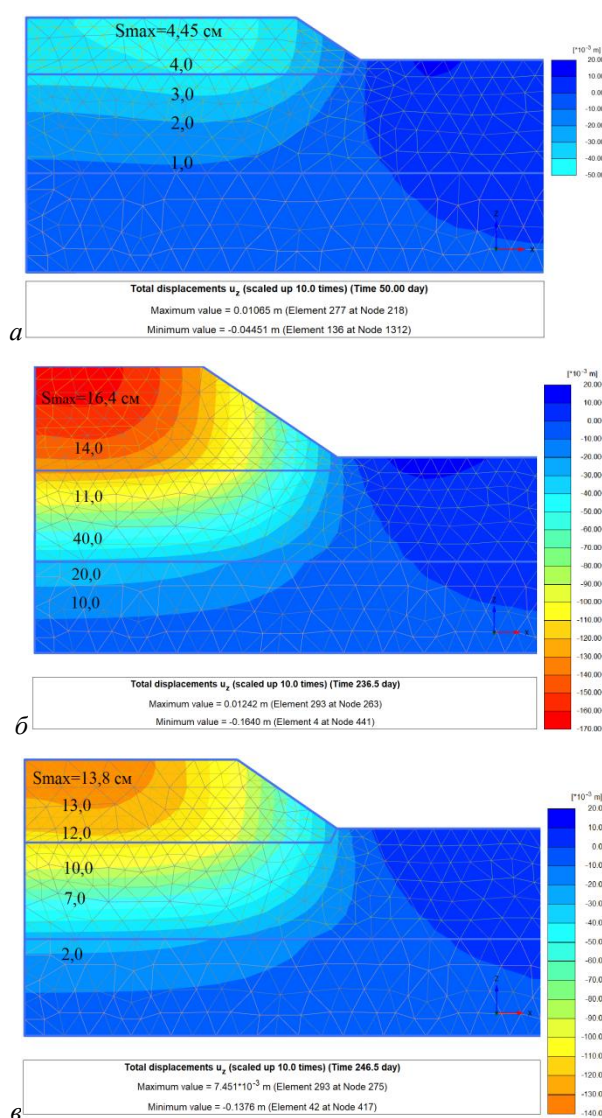


Рис. 6. Вертикальні деформації моделі на різних етапах спорудження земляного полотна:

а – завершення 2-го етапу (найбільші вертикальні деформації $S_{max} = 4,45$ см); б – завершення 4-го етапу ($S_{max} = 16,4$ см); в – після часткового розвантаження – 5 етап ($S = 13,8$ см)

За результатами чисельного моделювання – осідання земляного полотна після завершення 2-го етапу склало 4,45 см, а після 4-го етапу – 16,4 см. Після часткового розвантаження (5 етап) за рахунок пружних деформацій відбувся певний підйом основи, незворотні деформації земляного полотна склали 13,8 см (рис. 6).

У процесі консолідації розсіювання додаткового порового тиску у ґрунті до 20 кПа відбулось через 237 діб (рис. 7).

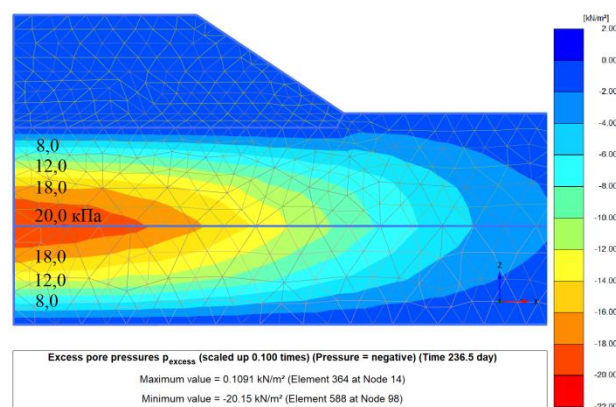


Рис. 7. Розсіювання надлишкового порового тиску в основі земляного полотна

У результаті чисельного моделювання НДС МСЕ при застосуванні моделі МС отримано, що умовна стабілізація осідань та пов'язане з цим завершення спорудження земляного полотна дороги відбудеться через 8 міс.

Розрахунок за моделлю Hardening Soil.

Для моделювання НДС з урахуванням зміцнення шару слабого ґрунту у процесі навантаження основи використано модель

HS, у якій реалізовані зміцнення при параметри до розрахунку наведені зрушенні та стисненні [11]. Основні в таблиці 2.

Таблиця 2

Основні параметри до розрахунку з урахуванням зміцнення ґрунтів основи

Параметри	Супісок	Суглинок	Глина
Модель ґрунту	Mohr-Coulomb	Hardening Soil	Hardening Soil
Тип поведінки	Дрен.	Не дрен.	Не дрен.
Питома вага ґрунту, γ_{unsat} , кН/м ³	17,4	15,5	16,5
Модулі жорсткості, кН/м ²	E_{50}^{ref} E_{oed}^{ref} E_{ur}^{ref}	5 000 8 025 15 000	17 500 17 500 52 500
Коефіцієнти Пуассона, ν	0,3	0,35	0,35
ν_{ur}	—	0,2	0,2
Питоме зчеплення, c_{ref} , кН/м ²	13	12	35
Кут внутрішнього тертя, ϕ , град.	25	22	20
m	—	0,5	0,5

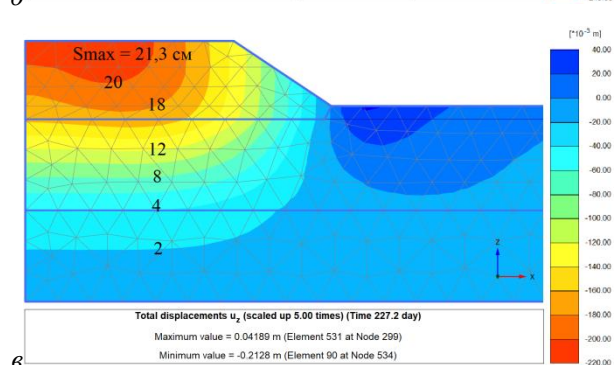
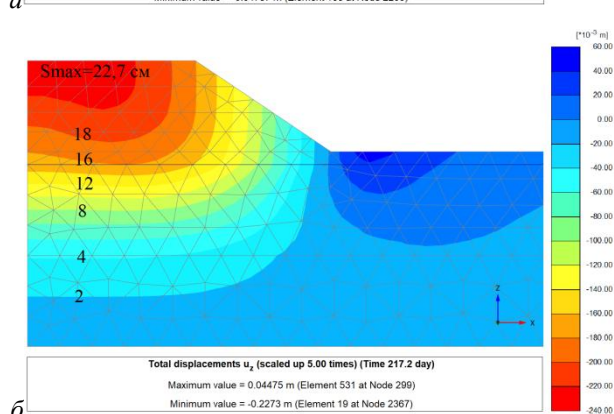
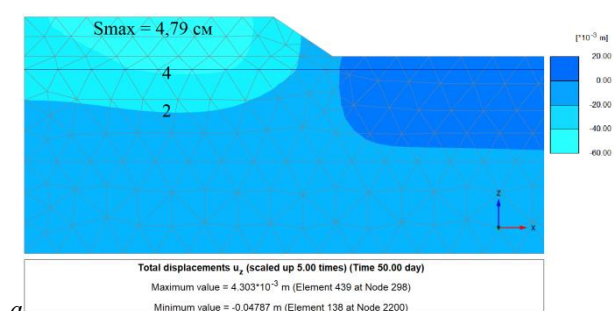


Рис. 8. Вертикальні деформації моделі на різних етапах спорудження земляного полотна:

а – завершення 2-го етапу (найбільші вертикальні деформації $S_{max} = 4,79$ см); б – завершення 4-го етапу ($S_{max} = 22,7$ см); в – після часткового розвантаження – 5 етап ($S_{max} = 21,3$ см)

За результатами чисельного моделювання – осідання земляного полотна після завершення 2-го етапу склало 4,79 см, а після 4-го етапу – 22,7 см (рис. 8).

Після часткового розвантаження (5 етап – видалення насипу привантаження) невідновлювальні вертикальні деформації земляного полотна склали 21,3 см, тобто пружна складова – 1,4 см, що у порівнянні з моделлю МС менше на 86 %.

Проаналізувавши результати розрахунку за моделлю HS встановлено, що до тиску на основу 90 кН/м² відбувається ущільнення і зміцнення шару слабого ґрунту – водонасиченого суглинка. При збільшенні навантаження об'єм зміцненого ґрунту в основі досягає підстиляючого шару – глини, про що свідчать точки зміцнення під завантаженою площею (рис. 9).

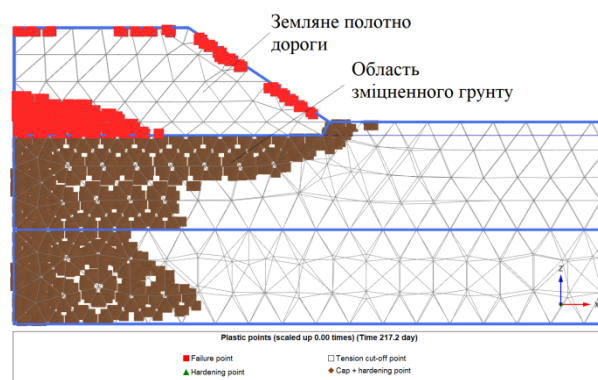


Рис. 9. Области зміцнення та пластичних деформацій у ґрунті

Чисельне моделювання МСЕ дозволило проаналізувати зони зміцнення і пластичних деформацій в основі та визначити значення

тиску, яке буде ефективним для ущільнення і зміцнення ґрунту. При тиску від насипу до 130–140 кН/м² в основі відбувається зміцнення ґрунту.

Розсіювання надлишкового порового тиску та консолідація ґрунту і умовна стабілізація осідання за моделлю *HS* відбулись через 7,5 міс. при осіданні земляного полотна $S = 22,7$ см (рис. 10).

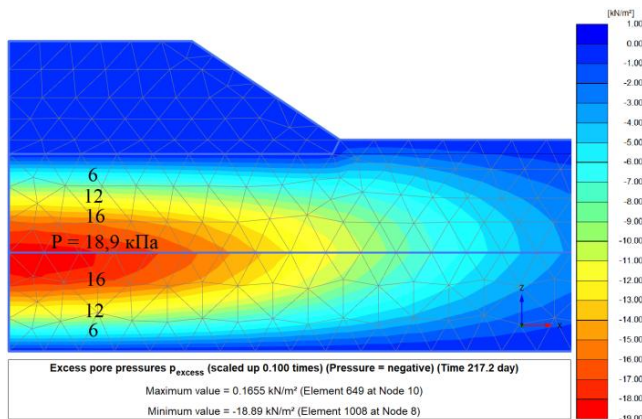


Рис. 10. Розсіювання надлишкового порового тиску в основі земляного полотна

Після розвантаження за рахунок пружних (відновлювальних) деформацій ґрунту кінцеві значення осідання насипу склали 21,3 см.

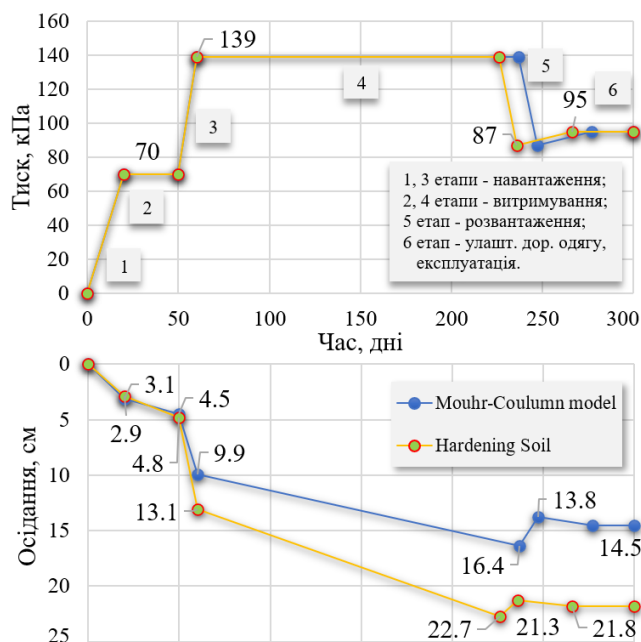


Рис. 11. Графік осідань земляного полотна дороги в процесі спорудження за результатами чисельного розрахунку МСЕ

На рисунку 11 наведено графік осідань земляного полотна дороги у процесі його

спорудження за результатами чисельного розрахунку з використанням моделей *MC* та *HS*.

Згідно із аналітичним розрахунком за ДСТУ [1] кінцеве осідання основи склало $S_{\text{кінц}} = 19$ см. Час осідання основи при ступеню консолідації 70 % становить $t = 0,36$ року, а при 95 % – $t = 1,01$ року.

На ефективність ущільнення основи впливають фільтраційні та деформаційні властивості ґрунтів, інтенсивність та час поверхневого привантаження.

При проєктуванні земляного полотна необхідно визначати стійкість основи та укосів насипу у процесі спорудження та після стабілізації деформацій. У програмі PLAXIS стійкість оцінювалась за «коефіцієнтом безпеки», який визначається за даними чисельного моделювання напружено-деформованого стану з урахуванням зниження параметрів міцності ґрунтів. Коефіцієнт безпеки з умовою міцності Кулона визначається за виразом:

$$k_{\text{safety}} = \frac{\sigma_n \cdot \text{tg} \varphi + c}{\sigma_n \cdot \text{tg} \varphi_r + c_r},$$

де σ_n – нормальне напруження; c_r і φ_r – знижені значення питомого зчеплення та куту внутрішнього тертя, достатні для забезпечення рівноваги.

У результаті чисельного моделювання МСЕ визначено, що стійкість укосів земляного полотна забезпечена. Коефіцієнт безпеки становить $k = 1,74$ (рис. 12).

При моделюванні насипу оцінювалась небезпека випору слабого ґрунту. Ознакою втрати стійкості основи є розвиток зон граничної рівноваги, де спротив ґрунту зрушенню нижче величини небезпечних дотичних напружень. Такі зони при чисельному моделюванні аналізувались за точками пластичних деформацій у ґрунті. Втрати несучої здатності у процесі розрахунку не відбулось. Стійкість основи споруди забезпечена.

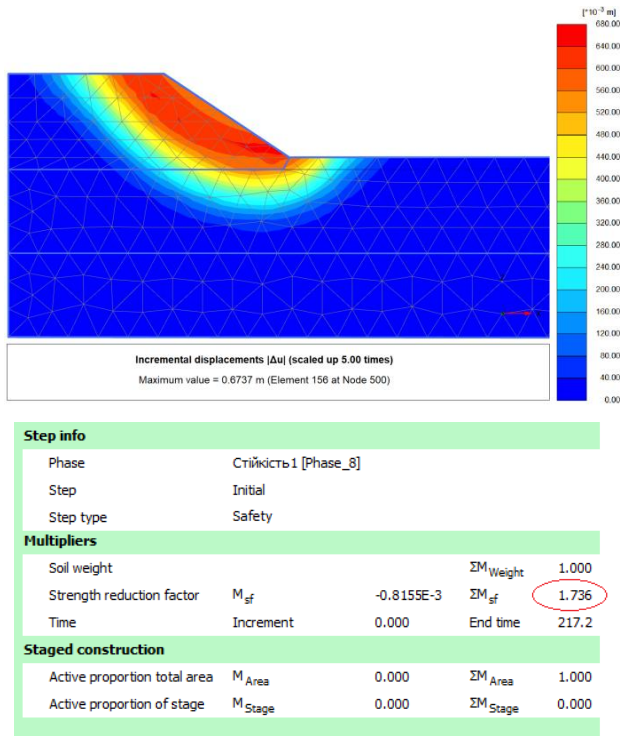


Рис. 12. Результати розрахунку стійкості укосу насипу

Розрахунок НДС земляного полотна на слабкій основі з вертикальними дренами.

Час стабілізації осідань може бути вирішальним фактором при обґрунтуванні доцільності застосування методу ущільнення слабкої ґрунтової основи попереднім привантаженням. Згідно із ДСТУ [2] рекомендується для зменшення відстані руху води, що витискається з ґрунту, влаштовувати вертикальні дрени із крупного чи середньої крупності піску, а по верху дрени поєднувати фільтруючим шаром.

У якості альтернативного рішення виконано розрахунок за моделлю HS НДС земляного полотна на слабкій основі з вертикальними піщаними дренами, що улаштовані з кроком 3,0 м і пронизують всю товщу слабого ґрунту $H_d = 7$ м. Дрени об'єднані по верху фільтраційним шаром товщиною 1 м із крупнозернистого піску.

При тисках 70–100 кН/м² в основі насипу зафіксовано формування областей зміцнення ґрунту між дренами. Після перевищення вертикальними напруженнями значень 100–110 кН/м² відбуваються деформації підстиляючого шару глини вже зміцненим масивом суглинку.

Розсіювання надлишкового порового тиску та консолідація шарів суглинку і глини відбулись через 3,5 міс. при осіданні земляного полотна $S = 17,3$ см (рис. 13).

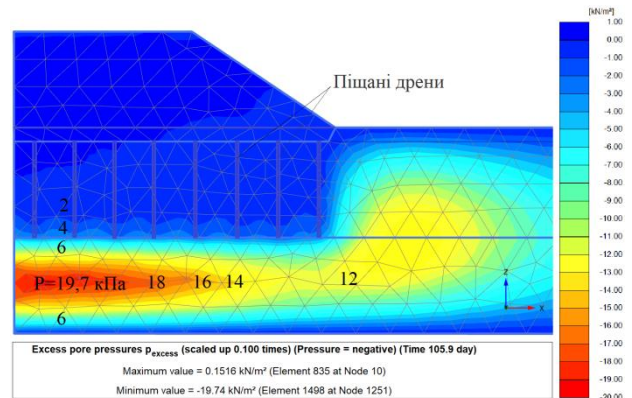


Рис. 13. Розсіювання надлишкового порового тиску в основі з вертикальними дренами

Аналітичним розрахунком за ДСТУ [2] при величині ступеню консолідації $Q_r = 0,9$ визначено час консолідації шару слабого ґрунту, який залежить від наступних факторів:

$$c_v \cdot \frac{t}{\ln \left[\frac{1}{1 - Q_r} \right]} = 55 \cdot \frac{1}{\ln \left[\frac{1}{1 - 0,9} \right]} = 23,9$$

$$T_{v2} = \frac{c_v t}{h^2} = \frac{23,9 \cdot 0,3}{7^2} = 0,146.$$

Залежність ступеню консолідації від факторів часу: при $T_{v1} = 0,098$, $Q_{v1} = 0,32$; при $T_{v2} = 0,146$, $Q_{v1} = 0,39$. Співвідношення діаметру дрени до діаметру зони її ефективного впливу:

$$v = d_e / d_w = 3 / 0,5 = 6,0.$$

Визначено, що при $Tr = 0,2$ $Q_r = 0,777$; при $Tr = 0,3$ $Q_r = 0,890$ [2].

Величина ступеню консолідації:

$$Q_{r,v1} = 1 - (1 - Q_r) \cdot (1 - Q_v) = 1 - (1 - 0,777) \cdot (1 - 0,32) = 0,848 ,$$

$$Q_{r,v2} = 1 - (1 - 0,890) \cdot (1 - 0,39) = 0,933,$$

$$t = t_1 + (t_1 - t_2) \cdot \frac{Q_r - Q_{r,v1}}{Q_{r,v2} - Q_{r,v1}} = 0,2 + (0,3 - 0,2) \cdot \frac{(0,9 - 0,848)}{(0,933 - 0,848)} = 0,184 \text{ року}$$

Розрахунковий час консолідації шару слабого ґрунту – суглинку, склав 67 діб. Чисельним моделюванням урахована не лише консолідація суглинку, а і підстиляючого шару – глини, тому часу знадобилось більше.

Таким чином, улаштування вертикальних дренажів дозволяє суттєво скоротити час консолідації слабого ґрунту, що залежить від фільтраційних властивостей ґрунту та ефективності дренажної системи. У розглянутих умовах час консолідації ґрунту за рахунок роботи вертикальних дренажів скоротився у 2 рази.

Розрахунок НДС земляного полотна на піщаній подушці.

У якості альтернативного рішення розглянуто варіант часткової заміни слабого шару подушкою товщиною 3,0 м із піску середньої крупності з характеристиками: $E = 20$ МПа; $\nu = 0,3$; $\varphi = 37^\circ$, $c = 0$ кПа; $\psi = 0^\circ$; $\gamma = 17$ кН/м³; $k = 1,2$ м/добу.

За даними чисельного розрахунку за моделлю HS після завершення спорудження першої частини земляного полотна на піщаній подушці загальні вертикальні деформації склали 4,8 см, а після спорудження другої частини земполотна та відсіпання шару тимчасового привантаження – 17,3 см (рис. 14).

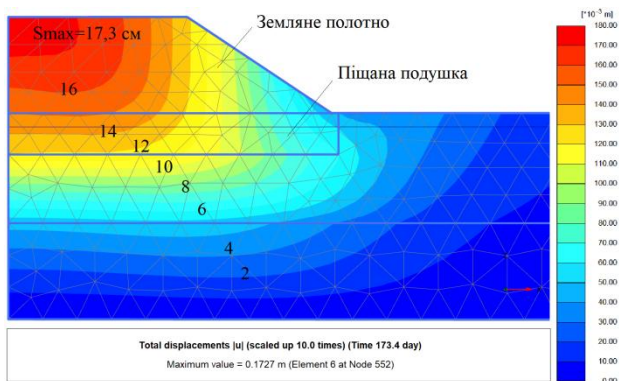


Рис. 14. Загальні деформації земляного полотна на піщаній подушці ($S_{max} = 17,3$ см)

Розсіювання надлишкового порового тиску та консолідація шарів суглинку і глини відбулись через 5,8 міс. (рис. 15).

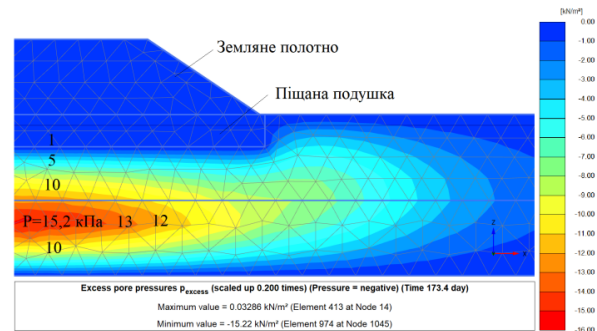


Рис. 15. Розсіювання надлишкового порового тиску в основі земляного полотна на піщаній подушці

На рисунку 16 наведено графік осідань земляного полотна дороги на слабкій основі з вертикальними дренажами та на піщаній подушці за результатами чисельного розрахунку.

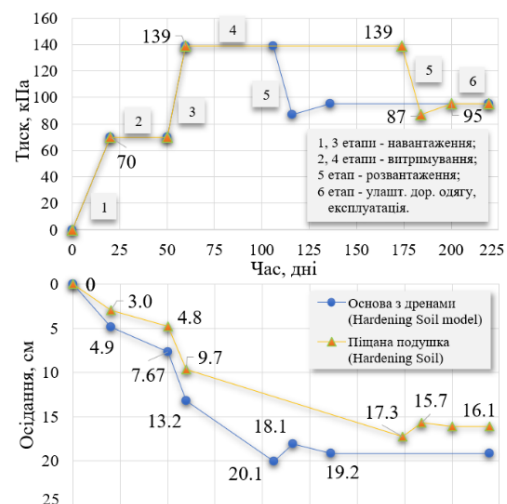


Рис. 16. Графік осідань земляного полотна дороги у процесі спорудження на слабкій основі з вертикальними дренажами та на піщаній подушці за результатами чисельного розрахунку МСЕ

Порівнявши графіки осідань земляного полотна дороги у часі (див. рис. 11, 16) можливо зробити висновок, що привантаження слабкої основи фільтруючим насипом з вертикальними дренажами є більш ефективним у порівнянні з іншими розглянутими варіантами. Улаштування піщаної подушки, як правило, є економічно доцільним при незначній її товщині та потужності слабого шару.

Після умовної стабілізації осідань (консолідація від 80 до 90 %) допускається улаштування дорожнього одягу та експлуатація автодороги [1].

Висновки

Для моделювання МСЕ НДС основ при навантаженні та частковому розвантаженні (ефект попереднього обтиснення) шару слабого ґрунту у процесі спорудження земляного полотна автодороги є доцільним використання пружно-пластичної моделі ізотропного зміцнення.

Застосування методу привантаження фільтруючим насипом з улаштуванням вертикальних дренажів забезпечить зміцнення слабких ґрунтів та підвищення несучої

здатності основи у короткі терміни, що дозволить експлуатувати автодорогу без значних додаткових деформацій, тим самим підвищити її надійність в експлуатації.

Розглянута методика чисельного моделювання МСЕ НДС може бути використана при проєктуванні споруд на слабких ґрунтах, що передбачає розрахунки осідань і напружень, надлишкового порового тиску, часу консолідації, аналіз зон пластичних деформацій, зміцнення ґрунту і стійкості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 9186:2022. Настанова з проєктування земляного полотна автомобільних доріг. [Чинний від 2023-02-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. 114 с.
2. ДСТУ-Н Б.В. 1.1.-40:2016. Настанова щодо проєктування будівель і споруд на слабких ґрунтах. [Чинний від 2017-04-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2017. 66 с.
3. Друкований М. Ф. та ін. Армування основ будівель і споруд : монографія. Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. 235 с.
4. Zotsenko N., Vynnykov Y. Designing the compacted subsoil's using mathematical simulation method. *Proceedings of the XIII Danube-European Conference on Geotechnical Engineering* (Ljubljana, 2006). № 2. Pp. 385–390.
5. Киричек Ю. А., Трегуб А. В., Тымчишин Е. М. Определение допускаемого давления на основания фундаментов мелкого заложения по данным численного упругопластического решения. *Науково-технічний збірник: Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. Київ : НТУ, 2013. Вип. 89. С. 177–184.
6. Клепиков С. Н. Расчет сооружений на деформируемом основании. Київ : НИИСК, 1996. С. 60–85.
7. Тугаенко Ю. Ф. Развитие деформаций в основаниях фундаментов, способы их ограничения и методы оценки. Монография. Одесса : Астропринт, 2003. С. 112–114.
8. Braja M. Das, Khaled Sobhan. Principles of Geotechnical Engineering. Eighth Edition, SI – Cengage Learning, 2014. 770 p.
9. ДБН В.2.1-10:2018. Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення. [Чинний від 2019-01-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2018. 36 с.
10. Brinkgreve R. B. J. & Vermeer P. A. PLAXIS : Finite Element Code for Soil and Rock Analyses, Version 7. Balkema, 1998.
11. Schanz T., Vermeer P. A. The Hardening Soil Model : Formulation and verification. *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*. Balkema. Rotterdam, 1999. № 1. Pp. 281–290.

REFERENCES

1. DSTU 9186:2022. *Nastanova z proyektuvannya zemlyanoho polotna avtomobil'nykh dorih*. Chynnyy vid 2023-02-01 [DSTU 9186:2022. Guidelines for the design of road subgrade. Valid from 2023-02-01]. Kyiv : DP "UkrNDNTS" Publ., 2022, 114 p. (in Ukrainian).
2. DSTU-N B.V.1.1.-40:2016. *Nastanova shchodo proektuvannya budivel' i sporud na slabkykh gruntakh* [DSTU-N B.V.1.1.-40:2016. Guidelines for the design of buildings and structures on weak soils]. Kyiv : Minrehionbud of Ukraine, 2017, 66 p. (in Ukrainian).
3. Drukovanyy M.F. and oth. *Armuvannya osnov budivel' i sporud : monohrafiya* [Reinforcement of foundations of buildings and structures]. Vinnytsya : UNIVERSUM-Vinnytsya, 2006, 235 p. (in Ukrainian).
4. Zotsenko N. and Vynnykov Y. Designing the compacted subsoil's using mathematical simulation method. *Proceedings of the XIII Danube-European Conference on Geotechnical Engineering* (Ljubljana, 2006). No. 2, pp. 385–390.
5. Kirichek Yu.A., Tregub A.V. and Tymchishin E.M. *Opredelenye dopuskaemoho davlenyya na osnovanyya fundamentov melkoho zalozhenyya po dannym chyslennoho uprugoplastycheskoho reshenyya* [Determination of the permissible pressure on the bases of shallow foundations based on the data of the numerical elastoplastic solution]. *Naukovo-tekhnichnyy zbirnyk : Avtomobil'ni dorohy i dorozhnye budivnytstvo* [Scientific and technical collection : Highways and Road Construction]. Kyiv : NTU Publ., 2013, vol. 89, pp. 177–184. (in Russian).

6. Klepikov S.N. *Raschet sooruzheniy na deformiruyemom osnovanii* [Calculation of structures on a deformable foundation]. Kyiv : NIISK Publ., 1996, pp. 60–85. (in Russian).
7. Tugayenko Yu.F. *Razvitiye deformatsiy v osnovaniyakh fundamentov, sposoby ikh ogranicheniya i metody otsenki : monografiya* [Development of deformations in foundation bases, methods of their limitation and methods of assessment : monograph]. Odessa : Astroprint Publ., 2003, pp. 112–114. (in Russian).
8. Braja M. Das and Khaled Sobhan *Principles of Geotechnical Engineering*. Eighth Edition, SI – Cengage Learning, 2014, 770 p.
9. *DBN V.2.1-10:2018. Osnovy i fundamenty budivel' ta sporud. Osnovni polozhennya* [DBN V.2.1-10:2018. Foundations and foundations of buildings and structures. Basic provisions.]. Kyiv : Minrehionbud of Ukraine, 2018, 36 p. (in Ukrainian).
10. Brinkgreve R.B.J. and P.A. Vermeer. *PLAXIS : Finite Element Code for Soil and Rock Analyses*. Version 7, Balkema, 1998.
11. Schanz T. and Vermeer P.A. The Hardening Soil Model: Formulation and verification. *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*. Balkema. Rotterdam, 1999, no. 1, pp. 281–290.

Надійшла до редакції: 03.03.2025.