

Прусов Д.Е., к.т.н, Мінакова А.О.

НАУ, м. Київ

ОСОБЛИВОСТІ ЧИСЕЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНУ ЗАГЛИБЛЕНИХ КОНСТРУКЦІЙ ТРАНСПОРТНИХ СПОРУД

Виконано аналіз досліджень взаємодії штучних огорожуючих конструкцій транспортних споруд з неоднорідною ґрунтовою основою покриттів. Розроблено математичну модель дослідження ґрунтового півпростору з використанням нелінійної теорії пружності. Наведено результати чисельних досліджень напружено-деформованого стану огорожуючої конструкції шляхопроводу у взаємодії з багатошаровим неоднорідним півпростором та покриттями під впливом смугового навантаження.

Вступ

У теперішній час постійне зростання концентрації населення в великих містах і, як наслідок, зростання автомобільного парку породжують найбільш гостру проблему сучасних мегаполісів — територіальну. Світова практика містобудування свідчить, що одним з найбільш ефективних вирішень даної проблеми є освоєння використання міського підземного простору. Зарубіжний досвід показує, що для комфортного мешкання в мегаполісі доля підземних споруд від загальної площі об'єктів, що вводяться, повинна складати 20-25%. Будівництво підземних комплексів різного призначення вже давно ведеться у всьому світі.

Підземне будівництво споруджень дорожньої і транспортної мережі дозволить організувати швидкісний рух автотранспорту і одночасно підвищити безпеку руху пішоходів. Відсутність затримок автомобільного транспорту в «пробках» знизить витрати часу на пересування містом, знизить рівень транспортних шумів, а також рівень забрудненості повітряного басейну вихлопними газами автомобілів.

Постановка проблеми

Для Донецька, як одного з мегаполісів України, будівництво підземних транспортних споруд є особливо актуальною задачею. Нестримно зростаючий транспортний потік та відсутність метрополітену роблять завдання розвитку мережі автомобільних доріг найбільш гострим.

Будівництво підземних транспортних споруд у місті Донецьку має свої особливості. Пов'язано це з наступними факторами:

- наявність тектонічних порушень, розмаїття геологічних особливостей і змін у межах невеликих просторів;
- масив гірських порід і земна поверхня багато разів підроблялися вугільними шахтами в різний час на різних глибинах;
- можлива дія гірничих виробок на підземну споруду в перспективі;
- закриття нерентабельних шахт із подальшим їх затопленням може викликати зсув масиву гірничих порід.

Будівництво підземних транспортних споруд у складних гірничо-геологічних умовах Донбасу – складний і багатогранний процес, що вимагає вирішення наступних задач:

- 1) визначення точного розташування і параметрів тектонічних порушень і старих гірничих виробок;
- 2) отримання вихідних даних щодо зрушень і деформацій ґрунтових масивів, що підробляються;
- 3) розробка достовірної розрахункової моделі взаємодії підземної споруди з ґрунтовим масивом, що підробляється.

Аналіз досліджень

Останні дослідження взаємодії ґрунтової основи покриттів зі штучними огорожуючими конструкціями пов'язані з визначенням напружено-деформованого стану і стійкості ґрунтового масиву, який підпирається цими конструкціями. Під час проектування дорожніх та аеродромних покриттів, що знаходяться на ділянках з ґрунтовими умовами другого типу по просіданню, для запобігання замочування ґрунту передбачається влаштування гідроізоляційного шару під дорожнім або аеродромним одягом. Але ці заходи на практиці часто бувають малоефективними. Для розв'язання цієї проблеми розглянуто методику розрахунку пружного півпростору, що використовується у дослідженні взаємодії ґрунтової основи покриттів зі штучними огорожуючими конструкціями [1, 2].

Постановка завдання

В основі зазначеної методики — метод скінченних елементів (СЕ), що є одним з ефективних сіткових методів. У постановці задачі при моделюванні півпростору передбачається неоднорідність прошарків ґрунтів. Оцінка напруженого стану півпростору передбачає співставлення результатів розрахунку з гранично допустимими деформаціями та переміщеннями, тобто можливі локальні області втрати стійкості та розвитку пластичних деформацій. У зв'язку з вищенаведеними фактами розглядається постановка плоскої задачі нелінійно-деформованого твердого тіла з урахуванням геометричної та фізичної нелінійності. У даній роботі використано співвідношення моментної схеми скінченних елементів (МССЕ) [3, 4].

Розглянемо вихідні співвідношення МССЕ на основі механіки суцільного середовища з використанням співвідношень аналітичної нелінійної теорії пружності та пластичності в приростах. Застосування теорії пружності для розв'язування задач механіки ґрунтів забезпечує достатньо точний опис напружено-деформованого стану ґрунтового простору в граничному та надграничному стані, при цьому пружні в'язі вибираються так, щоб вони відображали дійсні фізико-механічні властивості ґрунтів [5, 6].

Математична модель задачі

Метод скінченних елементів відноситься до енергетичних методів, тому для постановки задачі у якості теоретичної основи використовується теорія нелінійної механіки ґрунтів на базі механіки суцільного середовища із застосуванням співвідношень у приростах переміщень, деформацій і напружень. З урахуванням співвідношень нелінійної теорії пружності перший принцип віртуальної роботи для статичних задач в актуальній конфігурації тривимірного нелінійно-деформованого тіла можна записати у вигляді

$$\int_v \left(\sigma'^{ij} + C_{(e,p)}^{ijkl} \gamma_{kl} \right) \delta \gamma_{ij} dv - \int_v p^i \delta u_i dv - \int_S q^i \delta u_i dS = 0, \quad (1)$$

де σ'^{ij} — компонент тензора початкових напружень; $C_{(e,p)}^{ijkl}$ — компонент тензора пружностей твердого тіла з урахуванням розвитку пружно-пластичних деформацій; $\delta \gamma_{ij}$ — варіації коваріантних компонентів приростів тензора скінченних деформацій Коші-Грина у місцевій системі координат; x^i, p^i, q^i — компоненти узагальнених векторів об'ємних і поверхневих сил у глобальній системі координат $OZ^1 Z^2 Z^3$, що діють на тіло в актуальній конфігурації і віднесені до відлікової конфігурації; δu_i — варіації компонента вектора приростів переміщень у глобальній декартовій системі координат.

Варіаційне рівняння (1), відповідно до енергетичних методів, описує рівновагу елементарного об'єму будь-якого суцільного середовища, незалежно від його фізичних властивостей. Це представлення реалізує практичний вихід варіаційних задач теорії пружності і теорії граничного напруженого стану, де розв'язки пов'язані з відокремленням зон зсувних (для ґрунтів) пластичних деформацій. Таким чином розглядається детермінована задача статичної ґрунтової

го півпростору і у кожній точці (вузлах дискретної моделі і границях між ними) виконуються умови граничного напруженого стану [7].

Варіаційне рівняння (1) справедливе для розв'язування плоских задач нелінійної теорії пружності (плоский напружений стан та плоска деформація). Розглядається неоднорідний півпростір, який моделюється дискретним відображенням у вигляді набору скінченних елементів, кожен з яких є однорідним твердим тілом з різними фізико-механічними характеристиками ізотропних або ортотропних тіл, але на границях скінченних елементів виконується умова сумісності деформацій, тобто маємо справу із сумісними СЕ із забезпеченням нерівномірної сіткової області для апроксимації з певною мірою точності зон концентрацій напружень і розвитку зсувних деформацій, завдяки застосуванню тензора скінченних деформацій, який точно описує переміщення і повороти СЕ як жорсткого цілого.

Використовуються природні граничні умови (жорсткі), що реалізуються накладанням жорстких в'язів на границях дискретної розрахункової моделі, а також спеціальні граничні умови під час взаємодії з анкерними пристроями із введенням рівнянь геометричних кінематичних умов з реалізацією розв'язків варіаційної задачі методом невизначених множників Лагранжа, коли варіаційне рівняння дискретної моделі (1) доповнюється рівнянням умов деформування цієї моделі через систему геометричних зв'язків.

У даній роботі критерій стійкості, або текучості ґрунтового півпростору для окремої локальної однорідної ізотропної області, пропонується у найбільш універсальній формі на основі розширеного критерію Мізеса (за рахунок включення в нього залежності від гідростатичних напружень), з використанням поверхні навантаження за моделлю Мора-Кулона, і з урахуванням третього інваріанта тензор-девіатора функції напружень через інваріант Лоде-Надаї [8, 9]. Тому, що інваріанти тензора напружень визначаються через компоненти сфери і девіаторної частини функції напружень і допущення про однорідність і ізотропність локального околу півпростору робить їх незалежними від направлення нормалей октаедричних площин, розширений модифікований критерій текучості Мізеса можна навести у наступній формі:

$$f(\hat{\sigma}, \hat{\gamma}^{(p)}, \hat{S}, \alpha, \phi, c) = \frac{2}{3} I_1(\hat{S}^2) \cdot \left(\cos \alpha - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \alpha \sin \phi \right)^2 - \left[\frac{1}{\sqrt{3}} I_1(\hat{\sigma}) \sin \phi - \sqrt{3} c \cos \phi \right]^2 = 0, \quad (2)$$

де $\hat{\sigma}, \hat{S}, \hat{\gamma}^{(p)}$ — тензори відповідно загальних напружень, напружень девіаторної частини і пластичних деформацій; α, ϕ, c — відповідно інваріант напружень — кут Лоде-Надаї, кут внутрішнього тертя ґрунту і питоме зчеплення ґрунту.

Використовуючи теорію пластичної течії в рамках розширеного принципу Мізеса, на основі асоційованого закону протікання можна записати:

$$C_{(e,p)}^{ijkl} = C_{(e)}^{ijkl} - \beta n^{ij} n^{kl}; \quad n^{ij} = C_{(e)}^{ijkl} f_{,s,kl}; \quad (3)$$

$$\beta = (n^{ij} f_{,s,ij})^{-1}; \quad \sigma^{ij} = C_{(e,p)}^{ijk} \gamma_{kl}; \quad \gamma_{kl} = \gamma_{kl}^{(e)} + \gamma_{kl}^{(p)}. \quad (4)$$

Для отримання співвідношень (3), (4) необхідно продиференціювати скалярну функцію (2) по тензорному аргументу \hat{S} , як складну функцію.

Дискретна модель ґрунтового півпростору одиничної товщини представлена набором двовимірних чотирикутних криволінійних скінченних елементів (в загальному випадку), в кожному з яких введено місцевий косокутний базис \bar{e}_i з початком в центрі СЕ. В якості невідомих приймаємо вузлові переміщення СЕ в глобальній системі координат $OZ'Z''Z'''$. Зміна переміщень у межах СЕ визначається полілінійними функціями двох координат поверхні ґрунтового півпростору X^1, X^2 :

$$u^i = \sum_{s_1=\pm 1} \sum_{s_2=\pm 1} u_{s_1 s_2}^i \prod_{\delta=1}^2 \left(S_{(\delta)} x^{(\delta)} + \frac{1}{2} \right), \quad (5)$$

де $S_{\delta} = \pm 1$ — умовні лагранжеві координати; $u_{s_1 s_2}^i$ — вузлові переміщення;
 $-\frac{1}{2} \leq x^{\delta} \leq \frac{1}{2}$.

Апроксимація переміщень у межах СЕ та функція форми співпадають, отже, скінченний елемент, який використовується, є ізопараметричним.

Система нелінійних рівнянь рівноваги скінченно-елементної моделі плоского півпростору походить з виразу варіації повної потенціальної енергії для одного скінченного елемента:

$$\delta \Pi_E = \sum_{P_1=\pm 1} \sum_{P_2=\pm 1} (R'_{R P_2} - Q'_{R P_2}) \delta_{R P_2} u_{i'}^i. \quad (6)$$

Система нелінійних рівнянь рівноваги скінченно-елементної моделі півпростору справедлива для розв'язування плоских задач нелінійної теорії пружності [8]. Розв'язки задач плоского напруженого стану та плоскої деформації залежать від фізико-механічних характеристик використовуваного матеріалу. Для ізотропного твердого тіла у випадку плоского напруженого стану маємо:

$$g_{\alpha 3} = g^{\alpha 3} = G_{\alpha 3} = G^{\alpha 3} = 0; \quad \gamma_{\alpha 3} = 0; \quad \gamma_{33} \neq 0; \quad (7)$$

$$\sigma^{33} = 0; \quad (8)$$

$$\sigma^{\alpha\beta} = B^{\alpha\beta\gamma\epsilon} \gamma_{\gamma\epsilon}; \quad (9)$$

$$B^{\alpha\beta\gamma\epsilon} = \frac{E}{1+\nu} \left[\frac{\nu}{1-\nu} G^{\alpha\beta} G^{\gamma\epsilon} + \frac{1}{2} (G^{\alpha\beta} G^{\gamma\epsilon} + G^{\alpha\epsilon} G^{\gamma\beta}) \right]; \quad (10)$$

у випадку плоскої деформації маємо:

$$g_{\alpha 3} = g^{\alpha 3} = G_{\alpha 3} = G^{\alpha 3} = 0; \quad \gamma_{\alpha 3} = 0; \quad \gamma_{33} = 0; \quad (11)$$

$$\sigma^{33} \neq 0; \quad \sigma^{33} = \nu (\sigma^{11} + \sigma^{22}). \quad (12)$$

Для доведення достовірності вищенаведеної методики дослідження пружного півпростору розв'язано ряд тестових та контрольних задач [10].

Наведена методика дослідження ґрунтового півпростору з використанням нелінійної теорії пружності забезпечує достовірні результати розв'язків для плоскої задачі механіки ґрунтів з урахуванням неоднорідності півпростору, наявності шарів з різними фізико-механічними характеристиками, різними граничними умовами, довільними зовнішніми впливами, а також дає можливість розраховувати ґрунтовий півпростір з включеннями конструктивних елементів фундаментів, підпірних стін та інших захисних споруд.

Чисельні дослідження

Розглядається плоска задача дослідження напружено-деформованого стану огорожуючої конструкції шляхопроводу у взаємодії з багатошаровим неоднорідним півпростором та покриттями з впливом смугового навантаження, що моделює вертикальне колісне навантаження від транспортного засобу.

З урахуванням симетрії навантаження в поперечному напрямку покриття шляхопроводу, в якості розрахункової схеми (рис 1, 2) прийнято половину ширини шляхопроводу, тобто 9 м за шириною і 12 м за довжиною проїзної частини дороги, за висотою прийнято 6,5 м (висота шляхопроводу), 6,5 м (висота підземної частини палі) і 3,5 м (ґрунтового простору).

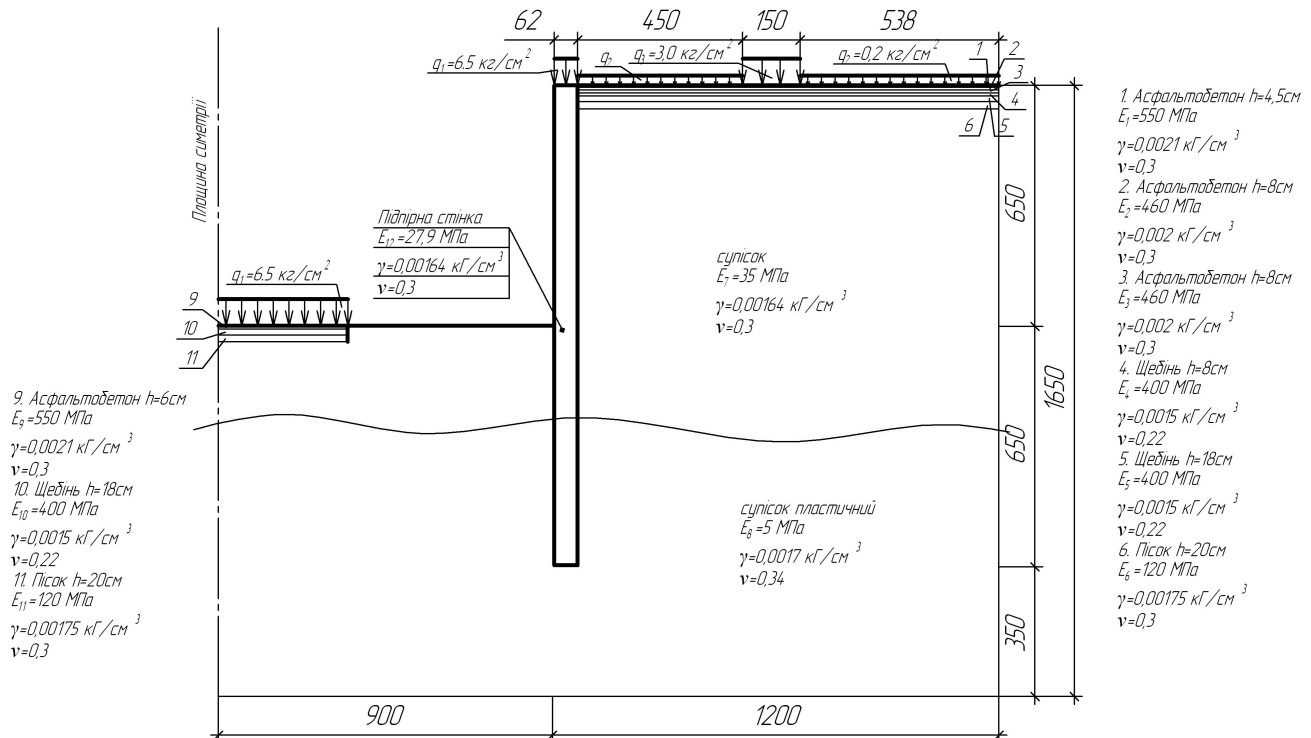


Рис. 1. Конструктивна схема взаємодії огорожуючої конструкції шляхопроводу з ґрунтовою основою

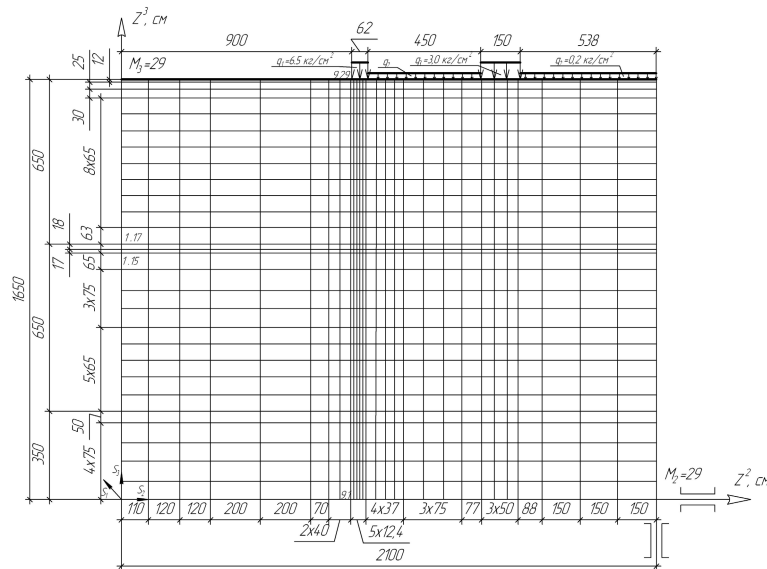


Рис. 2. Розрахункова схема взаємодії огорожуючої конструкції шляхопроводу з ґрунтовым півпростором

Зовнішні нормативні і розрахункові навантаження від снігу, ваги покриття прогонової будови, власної ваги конструкцій прогонової будови становлять $q=6,5 \text{ кг/см}^2$. На відстані 5,12 м від краю огорожуючої конструкції прикладається навантаження від транспортного засобу, що дорівнює $3,0 \text{ кг/см}^2$. Моделювання еквівалентного смугового навантаження зводиться до інтенсивності розподілу тиску, що дорівнює $q=0,2 \text{ кг/см}$. Несприятлива ситуація полягає у наявності прикладених навантажень на основному проїзді та за відсутності прикладених навантажень на проїзді під шляхопроводом.

Сіткова область розрахункової схеми регулярна з перемінним кроком для забезпечення описання огорожі за рахунок ексцентриситету оболонкового СЕ і моделювання навантаження від транспортного засобу.

З урахуванням величини стискаючої товщі півпростору дискретна модель має розміри $165\text{ см} \times 210\text{ см}$ (h). Виходячи з використовуваної моментної схеми скінченних елементів обираємо сіткову область з розмірами $M2 \times M3$ — 29×29 , що відповідає дискретній моделі, яка включає 841 СЕ, з урахуванням порожнини, що моделює виїмку ґрунту під шляхопроводом. Алгоритм розв'язку задачі передбачає, що на першій стадії порожнина відсутня, а на другій стадії здійснюється подовження за параметрами сіткових координат $S_3 = 29,9$, послідовно утворюється порожнина, починаючи від верхньої площини півпростору в межах сіткових координат $S_2 = 17 - 29$ для моделювання еволюції виїмки ґрунту під шляхопроводом.

Шляхопровід площею $697,5\text{ м}^2$ і глибиною $6,5\text{ м}$ має конструкцію огорожі типу „стіна в ґрунті” товщиною $0,62\text{ м}$. Висота стінки в ґрунті 13 м . Відповідно до умов реального будівельного об'єкту ґрунтовий півпростір складається із шарів, що мають різні фізико-механічні характеристики: нежорстке асфальтобетонне покриття товщиною $20,5\text{ см}$ $E = 550\text{ МПа}$, $\nu = 0,3$, $\gamma = 0,0021\text{ кГ/см}^3$; щебінь гранітний, просочений бітумом ($R_{ul} = 80\text{ МПа}$) — $E = 7 \cdot 10^2\text{ МПа}$, $\nu = 0,3$, $\gamma = 0,0020\text{ кГ/см}^3$; щебінь гранітний — $E = 3,5 \cdot 10^2\text{ МПа}$, $\nu = 0,22$, $\gamma = 0,0015\text{ кГ/см}^3$; пісок (останній шар штучної основи нежорсткого покриття) — $E = 120\text{ МПа}$, $\nu = 0,3$, $\gamma = 0,00175\text{ кГ/см}^3$; супісок (початок ґрунтової основи) — $E = 35\text{ МПа}$, $\nu = 0,3$, $\gamma = 0,00164\text{ кГ/см}^3$; супісок пластичний — $E = 35\text{ МПа}$, $\nu = 0,34$, $\gamma = 0,00171\text{ кГ/см}^3$.

Результати чисельних розрахунків, отримані на основі дискретної скінченно-елементної моделі, показують характер розвитку пластичних деформацій, що концентруються уздовж стіни в ґрунті з наступним подовженням у напрямках полосових навантажень і випору ґрунту (рис. 3).

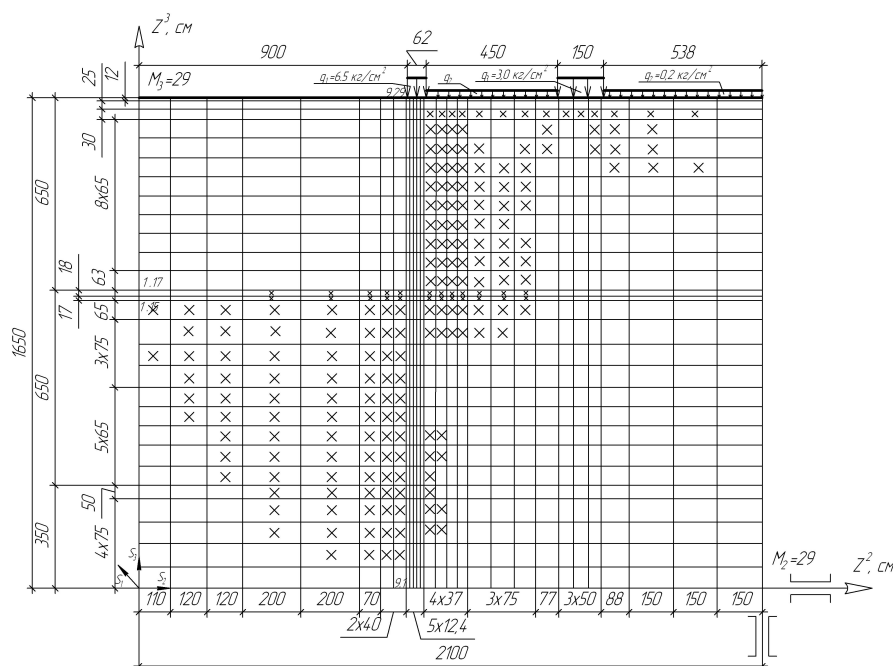


Рис. 3. Схема розвитку пластичних деформацій

Порівняння результатів чисельних досліджень (рис. 4, 5, 6) з інженерними розрахунками дозволило зробити висновок, що результати розрахунків за переміщенням і змінними моментами відрізняються через більш точне урахування напружено-деформованого стану ґрунтового півпростору у взаємодії з конструкціями транспортної споруди.

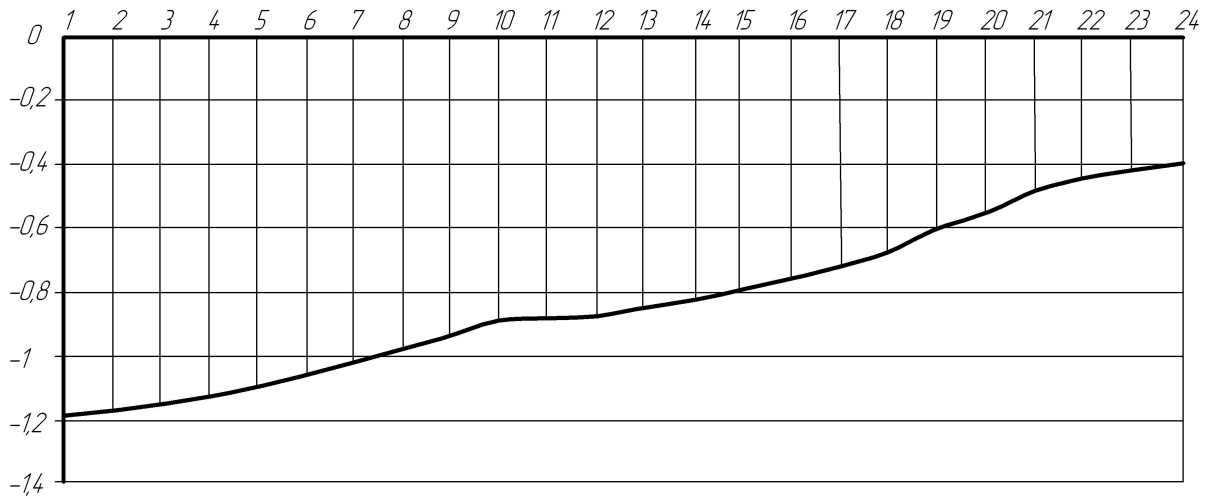


Рис. 4. Епюра переміщення огороджуючої конструкції

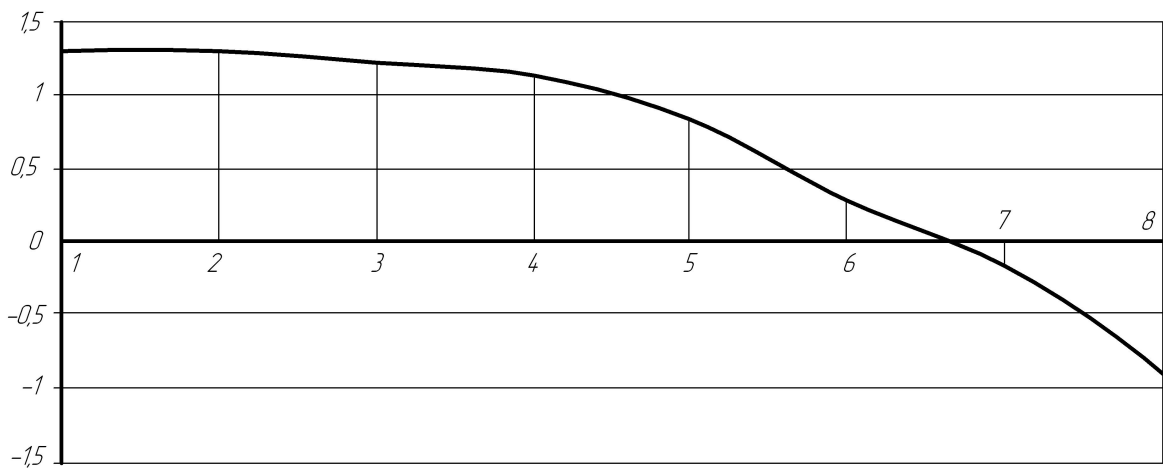


Рис. 5. Епюра переміщення поверхні під шляхопроводом

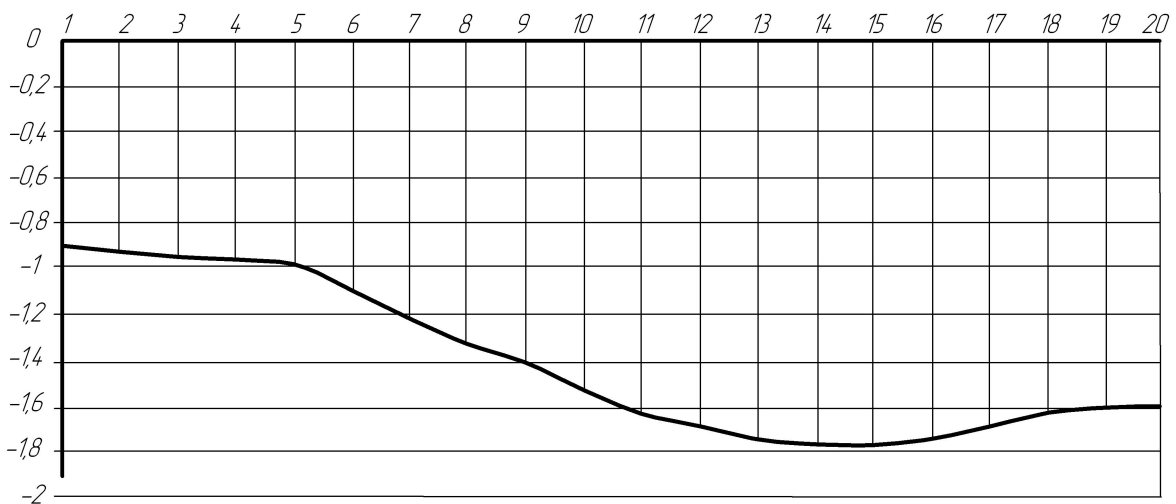


Рис. 6. Епюра переміщення поверхні основного проїзду

Аналіз напружено-деформованого стану ґрунтового масиву та огорожуючих конструкцій з паль свідчить про те, що внутрішні зусилля в елементах конструкцій та їх деформації не перевищують допустимих і дозволяють зберегти від руйнування дорожнє покриття. На основі отриманих результатів проведених досліджень взаємодії ґрунтової основи покриттів зі штучними огорожуючими конструкціями уточнено їх оптимальні розміри для запобі-

гання втрати стійкості ґрунтового масиву, а також розвитку процесів випару чи суфозії під час реконструкції та подальшої експлуатації шляхопроводу.

Висновки

Таким чином, методика дослідження ґрунтового півпростору з використанням нелінійної теорії пружності забезпечує достовірні результати розв'язків для плоскої задачі механіки ґрунтів з урахуванням неоднорідності півпростору, наявності шарів з різними фізико-механічними характеристиками, різними граничними умовами, довільними зовнішніми впливами.

На основі викладеної методики розрахунку ґрунтового півпростору з включеннями конструктивних елементів фундаментів, підпірних стін та інших захисних споруд, можна виконувати розрахунки для дослідження взаємодії ґрунтової основи та конструктивних елементів різноманітних заглиблених споруд у складних інженерно-геологічних умовах.

Список літератури

1. Гольдштейн М.Н. Механические свойства ґрунтов / М.Н. Гольдштейн. — М.: Стройиздат, 1973. — 375 с.
2. Харр М.Е. Основы теоретической механики ґрунтов / М.Е. Харр. — М.: Изд-во лит. по стр-ву, 1971. — 320 с.
3. Баженов В.А. Моментная схема метода конечных элементов в задачах нелинейной механики сплошной среды / В.А.Баженов, А.С. Сахаров, В.К. Цыхановский // Прикладная механика. — К.: Ин-т механики НАН Украины, 2002. — Т. 38 (48). — № 6, июль. — С. 24-63.
4. Баженов В.А. Метод скінченних елементів у задачах нелінійного деформування тонких та м'яких оболонок / В.А. Баженов, В.К. Цыхановський, В.М. Кислоокий. — К.: КНУБА, 2000. — 386 с.
5. Кузнецов В.И. Упругое основание. Расчёт балок, плит и рам / В.И. Кузнецов. — М.: ГИЛСА, 1952. — 296 с.
6. Горбунов-Посадов М. Расчёт конструкций на упругом основании / М. Горбунов-Посадов. — М.: Госстройиздат, 1953.
7. Цыхановський В.К. Метод скінченних елементів у задачах дослідження неоднорідного півпростору з урахуванням геометричної і фізичної нелінійності / В.К. Цыхановський, Д.Е. Прусов // Опір матеріалів та теорія споруд: наук.-техн. збірник. — Київ: КНУБА. — 2004. — Вип.75. — С. 87-98.
8. Шимановский А.В. Теория и расчет сильно нелинейных конструкций / А.В. Шимановский, В.К. Цыхановский. — Київ: Сталь, 2005. — 432 с.
9. Цыхановський В.К. Методика моделювання елементів покриттів у взаємодії з неоднорідним ґрунтовим півпростором / В.К. Цыхановський, Д.Е. Прусов // Опір матеріалів та теорія споруд: наук.-техн. збірник. — Київ: КНУБА. — 2005. — Вип. 76. — С. 87-98.
10. Прусов Д.Е. Моделювання напружено-деформованого стану неоднорідного ґрунтового масиву у взаємодії з залізобетонними конструкціями укріплень / Д.Е. Прусов // Збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. — Луганськ: Видавництво ЛНАУ, 2007. — № 71. — С. 34-43.

Стаття надійшла до редакції 10.11.08

© Прусов Д.Е., Мінакова А.О., 2008