ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2021, № 2 (92)

УДК 625.81:624.131

В. Г. ШАПОВАЛ[1*], Г. П. ІВАНОВА[2*], Р. М. ТЕРЕЩУК[3*], О. В. НЕСТЕРОВА[4*]

[1*]Каф. «Будівництво, геотехніка і геомеханіка», Національний технічний університет «Дніпровська політехника», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (095) 471 81 92, ел. пошта shapvv27@gmail.com, ORCID 0000-0003-2993-1311

[2*]Каф. «Будівництво, геотехніка і геомеханіка», Національний технічний університет «Дніпровська політехника», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (050) 45 29 945, ел. пошта ivanova.h.p@nmu.one, ORCID 0000-0003-4219-7916

[3*]Каф. «Будівництво, геотехніка і геомеханіка», Національний технічний університет «Дніпровська політехника», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38-(095) 751 25 26, ел. пошта Tereschuk.rm@gmail.com, ORCID 0000-0003-4509-2511

[4*]Каф. «Водопостачання, водовідведення та гідравліка», Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (0562) 756 34 74, ел. пошта nesterova.olena@pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0003-1035-6572

Осідання дорожнього полотна на складених зі слабких ґрунтів основах

Мета. Основною метою цієї роботи є побудова точних аналітичних залежностей осідання основи дорожнього полотна від його координат і прикладеного до верхньої межі основи трапецієподібного зовнішнього навантаження. Це дозволить розрахувати профіль осідання основи в межах і за межами насипу з використанням методу пошарового підсумовування. **Методика.** Для досягнення мети використано теоретичні дослідження геомеханічних процесів із використанням аналітичних і чисельних математичних методів. Аналіз і узагальнення результатів теоретичних досліджень. **Результати.** У рамках моделі основи у вигляді лінійного пружного ізотропного середовища й розрахункової схеми плоскої деформації отримано аналітичні залежності вертикальних і горизонтальних нормальних деформацій від координат півплощини, до верхньої межі якої прикладене навантаження у вигляді трапеції. На цій базі розроблено алгоритм побудови профілю осідання дорожнього полотна, складеного з ґрунтових матеріалів. **Наукова новизна.** Отримано аналітичні залежності вертикальних нормальних деформацій в основі дорожнього полотна з трапецеїдальним профілем від його координат. **Практична значимість.** Викладені в цій роботі результати досліджень дозволяють побудувати проєктний профіль дорожнього полотна з ґрунтових матеріалів з урахуванням сильної стискальної деформації ґрунту. Крім того, отримані результати можуть бути використані для визначення нижньої межі товщі основ, що стискаються, до верхньої межі яких прикладене розподілене навантаження трикутної або трапецієподібної форми.

Ключові слова: дорожнє полотно з ґрунтового матеріалу; плоска задача теорії пружності; нормальні вертикальні напруження в основі; розподілене навантаження трикутної і трапецієподібної форми; стан плоскої деформації

Вступ

Сьогодні під час проєктування дорожнього полотна на основах, що складені зі слабких ґрунтів, виникають такі проблеми:

1. Іноді осідання дорожнього полотна мають один порядок із його висотою [1, 8, 13]. У цьому випадку треба знати осідання основи полотна не тільки в його центрі, а й осідання характерних точок за всією площею підошви. Це важливо для досягнення відповідності профілю полотна його проєктному положенню з урахуванням деформацій земної поверхні.

2. Профіль дорожнього полотна зазвичай має трапецієподібну форму [3, 6, 7]. У такому випадку навантаження на основу відрізняється від прямокутного.

Також у роботі [2] коефіцієнт згасання додаткових напружень за глибиною (з його використанням розраховують вертикальні нормальні напруження за глибиною й осідання основи) наведений у табличній формі лише для навантаження, що має форму прямокутника (в аналітичній формі в нормативних документах ці дані також не представлені).

3. У чинних сьогодні на території України й ряду інших країн будівельних нормах щодо врахування зазначених факторів наявні досить загальні та приблизні вказівки [1–3, 6–8].

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2021/236306
© В. Г. Шаповал, Г. П. Іванова, Р. М. Терещук, О. В. Нестерова, 2021

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2021, № 2 (92)

Аналогічно спостерігаємо і в присвяченій цій проблемі науковій і технічній літературі [10, 12].

Зазначене дозволяє зробити висновок, що використання чинних на території України норм призводить до недостатньо точного врахування прикладеного до ґрунтової основи навантаження від ваги дорожнього полотна.

4. Останнім часом широкого використання для прогнозування напружено-деформованого стану ґрунтових основ набув метод скінченних елементів [5, 11]. Однак у цьому випадку на результати розрахунку істотно впливають розміри розрахункової області основи.

Оскільки в нормативних документах України відсутні будь-які вказівки щодо визначення розмірів розрахункової області, отримані в ході прогнозування напружено-деформованого стану основ дорожнього полотна дані потребують перевірки і, у разі потреби, коригування.

У наш час для визначення осідань основи дорожнього полотна використовують наближені формули, у яких не враховано вплив на це осідання горизонтальних нормальних напружень та геометрії поперечного профілю полотна.

Мета

У цій статті поставлено за мету знайти вирішення зазначених проблем шляхом побудови точних аналітичних залежностей осідань основи дорожнього полотна від координат і прикладеного до верхньої межі основи трапецієподібного зовнішнього навантаження.

Це дозволить розрахувати профіль осідань основи в межах і за межами насипу з використанням методу пошарового підсумовування.

Методика

За вихідні дані дослідження взято такі:

1. Розглядаємо найнесприятливіший випадок напружено-деформованого стану основи – дорожню з ґрунтового матеріалу, довжина якої значно більша за її ширину й висоту (рис. 1).

2. Поперечний профіль насипу має вигляд трапеції.

3. Тиск від ваги насипу на основу дорівнює добутку питомої ваги її матеріалу на висоту – відстань від підошви насипу до денної поверхні насипу по вертикалі.

Для вирішення поставлених завдань необхідно:

1. У рамках моделі лінійного пружного ізотропного середовища, за умови плоскої деформації та навантаження (рис. 1), отримати точні аналітичні рішення, необхідні для визначення осідань основи ґрунтових насипів.

2. Розробити алгоритм, що дозволяє враховувати під час визначення осідань ґрунтових насипів неоднорідність будови ґрунтової товщі.

3. Розробити алгоритм, що дозволяє одночасно враховувати викладені в п. 1 і 2 чинники.

Результати

На першому етапі задача дослідження була сформульована так. До основи прикладене трапецеїдальне вертикальне навантаження. У довільній точці основи потрібно визначити напруження, що обумовлені цим навантаженням.

Для розв’язання задачі була застосована схема профілю насипу (рис. 1), з використанням якої трикутна епюра контактних тисків може бути перетворена в трапецієподібне навантаження.

Подамо параметри контуру насипу таким чином:

1. Координата будь-якої точки трикутника *mnk* може бути розрахована з використанням формули:

$$Z_{mnk}(x)=H\cdot\left\{\begin{array}{l}\left(1+\dfrac{x}{a}\right)\left[\begin{array}{c}U(x+a)-\\-U(x)\end{array}\right]+\\+\left(1-\dfrac{x}{d}\right)\left[\begin{array}{c}U(x)-\\-U(x-d)\end{array}\right]\end{array}\right\}, \quad (1)$$

де H, a і d – див. схему на рис. 1, $U(x)$ – ступінчаста функція Хевісайда [4].

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2021/236306
© В. Г. Шаповал, Г. П. Іванова, Р. М. Терещук, О. В. Нестерова, 2021

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2021, № 2 (92)

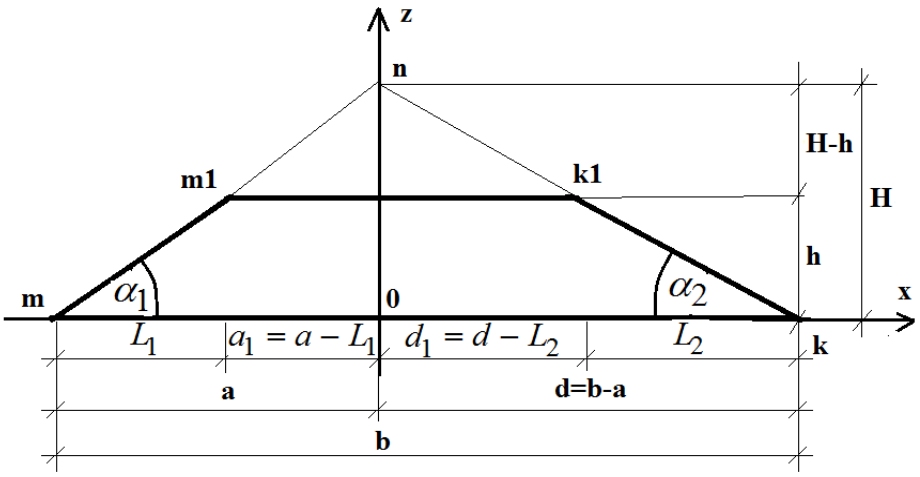

Рис. 1. Визначення геометричних розмірів ґрунтового насипу та навантаження на основу, яке залежить від його ваги, де:

h – висота насипу, b – ширина основи насипу; b_1 – ширина гребеня насипу;

α_1 та α_2 – кути закладення лівого та правого укосів насипу відповідно

Примітки: жирними лініями позначений контур насипу, а тонкими – допоміжні лінії

Fig. 1. Determination of the geometric dimensions of the soil embankment and the load on the base, which depends on its weight, where:

h – height of the embankment, b – width of the embankment base; b_1 – width of the embankment crest;

α_1 and α_2 – left and right slope angles of the embankment, respectively

Notes: bold lines indicate the contour of the embankment, and thin – auxiliary lines

2. Координата будь-якої точки трикутника m_1nk_1 на інтервалі висот $z \in (0, H-h)$ може бути розрахована з використанням формули:

$$Z_{m_1nk_1}(x) = (H-h)\cdot\left\{\begin{array}{l}\left(1+\dfrac{x}{a_1}\right)\left[\begin{array}{c}U(x+a_1)-\\-U(x)\end{array}\right]+\\+\left(1-\dfrac{x}{d_1}\right)\left[\begin{array}{c}U(x)-\\-U(x-d_1)\end{array}\right]\end{array}\right\}, \quad (2)$$

де H, h, a_1 і d_1 – див. схему на рис. 1.

3. Використавши схему на рис. 1 та формули (1) і (2), знайдемо координату будь-якої точки трапеції mm_1k_1k. Отримаємо:

$$Z_{mm_1k_1k}(x) = Z_{mnk}(x) - Z_{m_1nk_1}(x) =$$

$$= H\cdot\left\{\begin{array}{l}\left(1+\dfrac{x}{a}\right)\left[U(x+a)-U(x)\right]+\\+\left(1-\dfrac{x}{d}\right)\left[U(x)-U(x-d)\right]\end{array}\right\} -$$

$$-(H-h)\cdot\left\{\begin{array}{l}\left(1+\dfrac{x}{a_1}\right)\left[\begin{array}{c}U(x+a_1)-\\-U(x)\end{array}\right]+\\+\left(1-\dfrac{x}{d_1}\right)\left[\begin{array}{c}U(x)-\\-U(x-d_1)\end{array}\right]\end{array}\right\}. \quad (3)$$

4. Для того, щоб визначити навантаження на основу від одного метра довжини ґрунтового насипу, множимо координату, отриману з формули (3), на питому вагу матеріалу насипу $\gamma_{пл}$ й 1 метр, тоді:

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2021/236306
© В. Г. Шаповал, Г. П. Іванова, Р. М. Терещук, О. В. Нестерова, 2021

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2021, № 2 (92)

$$q(x)=\gamma_{\text{пл}}\cdot\left[Z_{mnk}(x)-Z_{m_1nk_1}(x)\right]=$$

$$=\gamma_{\text{пл}}\cdot H\cdot\left\{\begin{array}{l}\left(1+\dfrac{x}{a}\right)\left[U(x+a)-U(x)\right]+\\+\left(1-\dfrac{x}{d}\right)\left[U(x)-U(x-d)\right]\end{array}\right\}-$$

$$-\gamma_{\text{пл}}\cdot(H-h)\cdot\left\{\begin{array}{l}\left(1+\dfrac{x}{a_1}\right)\left[\begin{array}{c}U(x+a_1)-\\-U(x)\end{array}\right]+\\+\left(1-\dfrac{x}{d_1}\right)\left[\begin{array}{c}U(x)-\\-U(x-d_1)\end{array}\right]\end{array}\right\}. \quad (4)$$

Для визначення залежності напружень, що діють в основі насипу від координат, використовуємо відоме фундаментальне рішення Фламана про вертикальну зосереджену силу, прикладену до горизонтальної верхньої границі півплощини, і принцип суперпозиції. Згідно з [9] маємо:

$$\left.\begin{array}{r}\sigma_z(x,z)=\dfrac{2\cdot z^3}{\pi}\cdot\int\limits_{x_1}^{x_2}\dfrac{q(\xi)\cdot d\xi}{r(x,z,\xi)^4};\\ \sigma_x(x,z)=\dfrac{2\cdot z}{\pi}\cdot\int\limits_{x_1}^{x_2}\dfrac{q(\xi)\cdot(x-\xi)^2\cdot d\xi}{r(x,z,\xi)^4};\\ \tau_{xz}(x,z)=\dfrac{2\cdot z^2}{\pi}\cdot\int\limits_{x_1}^{x_2}\dfrac{q(\xi)\cdot(x-\xi)\cdot d\xi}{r(x,z,\xi)^4};\\ r=\sqrt{(x-\xi)^2+z^2}\end{array}\right\}, \quad (5)$$

де $\sigma_x(x,z)$ і $\sigma_z(x,z)$ – нормальні напруження, що діють в напрямку осей 0*x* і 0*z* відповідно; $\tau_{xz}(x,z)$ – дотичне напруження в площині 0*xz*; $q(x)$ – прикладене до денної поверхні основи навантаження.

Знайдемо розподіл вертикальних нормальних напружень $\sigma_{z,mnk}(x,z)$ в точці основи з координатами (*x*, *y*) від представленого на рис. 1 навантаження, розподіленого по трикутнику *mnk*.

Для цього у формулі (1) замінимо змінну x на змінну ξ, підставимо отриманий вираз у формулу (5), виконаємо процедуру інтегрування на інтервалі від $x_1=-a$ до $x_2=d$, помножимо отриманий таким чином вираз на γ, й отримаємо:

$$\left.\begin{array}{r}\sigma_{z,mnk}(x,z)=\gamma\cdot H\cdot\left[\begin{array}{l}\eta_1\cdot\operatorname{arctg}(\chi_1)+\\+\eta_2\cdot\operatorname{arctg}(\chi_2)-\\-\eta_3\cdot x\cdot\operatorname{arctg}(\chi_0)\end{array}\right];\\ \eta_1=(-x+d)/(\pi\cdot d);\\ \eta_2=(x+a)/(\pi\cdot a);\\ \eta_3=(d+a)/(\pi\cdot a\cdot d);\\ \chi_0=x/z;\\ \chi_1=(-x+d)/z;\\ \chi_2=(x+a)/z;\\ d=b-a\end{array}\right\}. \quad (6)$$

Далі знайдемо розподіл вертикальних нормальних напружень $\sigma_{z,m_1nk_1}(x,z)$ в точці основи з координатами (*x*, *y*) від представленого на рис. 1 навантаження, розподіленого по трикутнику m_1nk_1.

Для цього у формулі (2) замінимо змінну x на змінну ξ, підставимо отриманий вираз у формулу (5), виконаємо процедуру інтегрування на інтервалі від $x_1=-a_1$ до $x_2=d_1$, помножимо отриманий таким чином вираз на γ, й отримаємо:

$$\left.\begin{array}{r}\sigma_{z,m_1nk_1}=\gamma\cdot(H-h)\left[\begin{array}{l}\eta_4\cdot\operatorname{arctg}(\chi_3)+\\+\eta_5\cdot\operatorname{arctg}(\chi_4)-\\-\eta_6\cdot x\cdot\operatorname{arctg}(\chi_0)\end{array}\right];\\ \eta_4=(-x+d_1)/(\pi\cdot d_1);\\ \eta_5=(x+a_1)/(\pi\cdot a_1);\\ \eta_6=(d_1+a_1)/(\pi\cdot a_1\cdot d_1);\\ \chi_3=(-x+d_1)/z;\\ \chi_4=(x+a_1)/z;d=b-a\end{array}\right\}. \quad (7)$$

Залежність вертикального нормального напруження $\sigma_z(x,z)$ від координат знайдемо як різницю напружень $\sigma_{z,mnk}(x,z)$ і $\sigma_{z,m_1nk_1}(x,z)$. Маємо:

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2021/236306
© В. Г. Шаповал, Г. П. Іванова, Р. М. Терещук, О. В. Нестерова, 2021

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2021, № 2 (92)

$$\sigma_z(x,z)=\sigma_{z,mnk}(x,z)-\sigma_{z,m_1nk_1}(x,z)=$$

$$\left.\begin{aligned}&=\gamma\cdot H\cdot\begin{bmatrix}\eta_1\cdot\operatorname{arctg}(\chi_1)+\\+\eta_2\cdot\operatorname{arctg}(\chi_2)-\\-\eta_3\cdot x\cdot\operatorname{arctg}(\chi_0)\end{bmatrix}-\\&-\gamma\cdot(H-h)\begin{bmatrix}\eta_4\cdot\operatorname{arctg}(\chi_3)+\\+\eta_5\cdot\operatorname{arctg}(\chi_4)-\\-\eta_6\cdot x\cdot\operatorname{arctg}(\chi_0)\end{bmatrix}\end{aligned}\right\},\quad(8)$$

де η_1, η_2, η_3, η_4, η_5, η_6, χ_0, χ_1, χ_2, χ_3 і χ_4 – див. формули (5) і (6).

Аналогічним способом знайдемо горизонтальне нормальне напруження $\sigma_x(x,z)$. Отримаємо:

$$\left.\begin{aligned}&\sigma_x(x,z)=\\&=\gamma\cdot H\cdot\begin{bmatrix}-\eta_7\cdot\ln(\chi_5)-\\-\eta_8\cdot\ln(\chi_6)+\\+\eta_3\cdot z\cdot\ln(\chi_7)+\\+\eta_1\cdot x\cdot\operatorname{arctg}(\chi_1)+\\+\eta_2\cdot\operatorname{arctg}(\chi_2)-\\-\eta_3\cdot x\cdot\operatorname{arctg}(\chi_0)\end{bmatrix}-\\&-\gamma\cdot(H-h)\begin{bmatrix}-\eta_9\cdot\ln(\chi_8)-\\-\eta_{10}\cdot\ln(\chi_9)+\\+\eta_6\cdot z\cdot\ln(\chi_7)+\\+\eta_4\cdot x\cdot\operatorname{arctg}(\chi_3)+\\+\eta_5\cdot\operatorname{arctg}(\chi_4)-\\-\eta_6\cdot x\cdot\operatorname{arctg}(\chi_0)\end{bmatrix};\\&\eta_5=(x+a_1)/(\pi\cdot a_1);\\&\eta_6=(d_1+a_1)/(\pi\cdot a_1\cdot d_1);\\&\eta_7=z/(\pi\cdot d);\eta_8=z/(\pi\cdot a);\\&\eta_9=z/(\pi\cdot d);\ \eta_{10}=z/(\pi\cdot a);\\&\chi_5=z^2+(-x+d)^2;\chi_6=z^2+(x+a)^2;\\&\chi_7=x^2+z^2;\\&\chi_8=z^2+(-x+d_1)^2;\\&\chi_9=z^2+(x+a_1)^2;\\&d=b-a;\ d_1=b_1-a_1.\end{aligned}\right\},\quad(9)$$

де η_1, η_2, η_3, η_4, η_5, η_6, χ_0, χ_1, χ_2, χ_3 і χ_4 – див. формули (5) і (6).

Значення напружень $\sigma_z(x,z)$ і $\sigma_z(x,z)$ та використання методу пошарового підсумовування дозволяють визначити осідання основи на розрахунковій вертикалі $x=x^*$. Для цього необхідно:

1. Із використанням наведеної в роботі [2] методики знайти нижню межу товщі *H*, що стискається.

2. Після цього отримуємо:

$$\left.\begin{aligned}&S(x^*)=\sum_{i=1}^{n}\left[\varepsilon_z(x^*,z_i)+\varepsilon_z(x^*,z_{i+1})\right]\times\\&\qquad\times(z_i+z_{i+1})/2;\\&\varepsilon_z(x^*,z_i)=\frac{1}{E_i}\cdot\begin{bmatrix}(1-\nu_i)^2\cdot\sigma_z(x^*,z_i)-\\-\nu_i(1+\nu_i)\cdot\sigma_x(x^*,z_i)\end{bmatrix}\end{aligned}\right\},$$

де $S(x^*)$ – осідання основи на розрахунковій вертикалі; E_i і ν_i – модуль загальної деформації й коефіцієнт Пуассона на розрахунковій глибині; z_i і n – кількість елементарних шарів, на які розділена товща насипу, що стискається, на інтервалі глибин $z\in(0,H)$.

Наукова новизна та практична значимість

Отримано аналітичні залежності вертикальних нормальних деформацій в основі дорожнього полотна з трапецієподібним профілем від координат. Викладені в роботі результати досліджень дозволяють побудувати проєктний профіль дорожнього полотна з ґрунтових матеріалів з урахуванням сильної стискальної деформації ґрунту. Крім того, ці результати можуть бути використані для визначення нижньої межі товщі основ, що стискаються, до верхньої межі яких прикладене розподілене навантаження трикутної або трапецієподібної форми.

Висновки

У дослідження такі результати:

1. У рамках моделі основи у вигляді лінійного пружного ізотропного середовища й розрахункової схеми плоскої деформації отримано аналітичні залежності вертикальних і горизон-

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2021/236306
© В. Г. Шаповал, Г. П. Іванова, Р. М. Терещук, О. В. Нестерова, 2021

тальних нормальних деформацій від координат півплощини, до верхньої межі якої прикладене навантаження у вигляді трапеції.

2. Ці дані необхідні для розрахунку за другою групою граничних станів основ насипів із ґрунтових матеріалів, насипів залізничних, автомобільних доріг та інших лінійних споруд із трапецеїдальним перерізом, які розташовані на основах, що складені зі слабких ґрунтів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ахметова К. Ю., Сиряченко Л. В., Меньшикова Н. В., Краснов Е. С. Опыт проектирования и строительства земляного полотна на слабых грунтах в пермском крае. *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. 2017. № 2. С. 29–40.
2. *ДБН В.2.1-10-2018. Основи і фундаменти будівель та споруд.* [Чинний від 2019-01-01]. Київ : Мінрегіон України, 2016. 36 с.
3. *ДСТУ-Н Б В.2.3-32:2016. Настанова з улаштування земляного полотна автомобільних доріг*. [Чинний від 2017-01-01]. Київ : Мінрегіон України, 2016. 99 с.
4. Корн Г. *Справочник по математике для научных работников и инженеров*. *Определения, теоремы, формулы*. Москва : Книга по Требованию, 2014. 832 с.
5. Ромашкина М. А., Титок В. П. *Программный комплекс ЛИРА-САПР®. Руководство пользователя. Обучающие примеры*. Электронное издание, 2018. 254 с.
6. *РСН 09-85. Расчет дорожных насыпей на болотных грунтах*. Минск, 1985. URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293802/4293802419.htm (дата звернення: 15.04.2021).
7. *СП 45.13330.2017. Земляные сооружения, основания и фундаменты*. Москва : Стандартинформ, 2019.
8. *Справочная энциклопедия дорожника*. *Проектирование автомобильных дорог* / под ред. Федотова Г. А. и Поспелова П. И. Москва, 2007. Т. V. 1466 с. URL:http://www.amac.md/Biblioteca/data/26/02/Vasiliev/Tom-5.pdf (дата звернення: 15.04.2021).
9. Шаповал В. Г., Шаповал А. В., Моркляник Б. В., Андреев В. С. *Механика грунтов.* Днепропетровск : Пороги, 2010. 168 с.
10. Babets D. V., Kovrov O. S., Moldabayev S. K., Tereschuk R. M., Sosna D. O. Impact of water saturation effect on sedimentary rocks strength properties. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. № 4. P. 76–81. DOI: https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-4/076
11. Calvarano L. S., Leonardi G., Palamara R. Finite Element Modelling of Unpaved Road Reinforced with Geosynthetics. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 188. P. 99–104. DOI: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.017
12. Junhui Z., Junhui P., Ling Z., Jue L., Feng L. Rapid estimation of resilient modulus of subgrade soils using performance-related soil properties. *International Journal of Pavement Engineering.* 2021. Vol. 22. Iss. 6. P. 732–739. DOI: https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1643022
13. Maltseva T. V., Trefilina E. R., Saltanova, T. V. Deformed state of the bases buildings and structures from weak viscoelastic soils. *Magazine of Civil Engineering*. 2020. Vol. 95. Iss. 3. P. 119–130. DOI: https://doi.org/10.18720/MCE.95.11

V. H. SHAPOVAL[1*], H. P. IVANOVA[2*], R. M. TERESHCHUK[3*], O. V. NESTEROVA[4*]

[1*]Dep. «Construction, Geotechnics and Geomechanics», Dnipro University of Technology, Dmytra Yavornytskoho Av., 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (095) 471 81 92, e-mail shapvv27@gmail.com, ORCID 0000-0003-2993-1311
[2*]Dep. «Construction, Geotechnics and Geomechanics», Dnipro University of Technology, Dmytra Yavornytskoho Av., 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (050) 452 99 45, e-mail ivanova.h.p@nmu.one, ORCID 0000-0003-4219-7916
[3*]Dep. «Construction, Geotechnics and Geomechanics», Dnipro University of Technology, Dmytra Yavornytskoho Av., 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (095) 751 2526, e-mail Tereschuk.rm@gmail.com, ORCID 0000-0003-4509-2511
[4*]Dep. «Water Supply, Water Diversion and Hydraulics», Prydniprovska State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho St., Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38(097) 290 98 55, e-mail nesterova.olena@pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0003-1035-6572

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2021/236306
© В. Г. Шаповал, Г. П. Іванова, Р. М. Терещук, О. В. Нестерова, 2021

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Roadbed Sedimentation on Folded Bases with Weak Soils

Purpose. The main purpose of the work is to construct accurate analytical dependences of the sedimentation of the roadbed base on its coordinates and the trapezoidal external load applied to the upper limit of the base. This will allow the foundation settlement profile to be calculated within and outside the embankment using the layer-by-layer stacking method. **Methodology.** Theoretical studies of geomechanical processes using analytical and numerical mathematical methods were applied to achieve the purpose, as well as analysis and generalization of the results of theoretical research. **Findings**. Analytical dependences of vertical and horizontal normal deformations on the half-plane coordinates to the upper limit of which the trapezoidal load is applied were obtained within the framework of the base model in the form of a linear elastic isotropic medium and the calculated scheme of planar deformation. On this basis, an algorithm for constructing a profile of a roadbed sedimentation made of soil materials has been developed. **Originality.** Analytical dependences of vertical normal deformations in the roadbed base with a trapezoidal profile on its coordinates are obtained. **Practical value.** The research materials presented in this work make it possible to construct the design profile of the roadbed of soil materials, taking into account the strong compressibility of the soil. In addition, the results obtained can be used to determine the lower limit of the compressible strata of the bases, to the upper limit of which a distributed load of either a triangular or a trapezoidal form is applied.

Keywords: roadbed of soil material; plane problem of elasticity theory; normal vertical stresses in the base; distributed load of triangular and trapezoidal form; planar deformation state

REFERENCES

1. Akhmetova, K. Yu., Siryachenko, L. V., Menshikova, N. V., & Krasnov, Ye. S. (2017). Experience of design and construction of the earth leave on weak primes in the perm region. *About this journal transport. Transport facilities. Ecology*, *2*, 29-40. (in Russian)
2. *Osnovy i fundamenty budivelj ta sporud*, 36 DBN V.2.1-10-2018 (2016). (in Ukraine)
3. *Nastanova z ulashtuvannja zemljanogho polotna avtomobiljnykh dorigh*, 99 DSTU-N B V.2.3-32:2016. (2016). (in Ukraine)
4. Korn, G. (2014). *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov. Opredeleniya, teoremy, formuly*. Moscow: Kniga po Trebovaniyu. (in Russian)
5. Romashkina, M. A., & Titok, V. P. *Programmnyy kompleks LIRA-SAPR®. Rukovodstvo polzovatelya. Obuchayushchie primery*. Elektronnoe izdanie. (in Russian)
6. *Raschet dorozhnykh nasypey na bolotnykh gruntakh*, RSN 09-85. (1985). Retrieved from https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293802/4293802419.htm (in Russian)
7. *Zemlyanye sooruzheniya, osnovaniya i fundamenty*, SP 45.13330.2017. (2019). (in Russian)
8. Fedotov, G. A., & Pospelov, P. I. (Eds.). (2007). *Spravochnaya entsiklopediya dorozhnika*. In *Proektirovanie avtomobilnykh dorog* (Vol. V). Moscow. Retrieved from http://www.amac.md/Biblioteca/data/26/02/Vasiliev/Tom-5.pdf (in Russian)
9. Shapoval, V. G., Shapoval, A. V., Morklyanik, B. V., & Andreev, V. S. (2010). *Mekhanika gruntov*. Dnipropetrovsk: Porogi. (in Russian)
10. Babets, D. V., Kovrov, O. S., Moldabayev, S. K., Tereschuk, R. M., & Sosna, D. O. (2020). Impact of water saturation effect on sedimentary rocks strength properties. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, *4*, 76-81. DOI: https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-4/076 (in English)
11. Calvarano, L. S., Leonardi, G., & Palamara, R. (2017). Finite Element Modelling of Unpaved Road Reinforced with Geosynthetics. *Procedia Engineering*, *188*, 99-104. DOI: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.017 (in English)
12. Junhui, Z., Junhui, P., Ling, Z., Jue, L., & Feng, L. (2021). Rapid estimation of resilient modulus of subgrade soils using performance-related soil properties. *International Journal of Pavement Engineering*, 22(6), 732-739. DOI: https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1643022 (in English)
13. Maltseva, T. V., Trefilina, E. R., & Saltanova, T. V. (2020). Deformed state of the bases buildings and structures from weak viscoelastic soils. *Magazine of Civil Engineering*, *95*(3), 119-130. DOI: https://doi.org/10.18720/MCE.95.11 (in English)

Надійшла до редколегії: 13.11.2020
Прийнята до друку: 12.03.2021

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2021/236306
© В. Г. Шаповал, Г. П. Іванова, Р. М. Терещук, О. В. Нестерова, 2021