

УДК 624.131:624.137.2

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ КОНСТРУКЦІЇ «ГРУНТ—ГЕОТЕКСТИЛЬ» В ЯКОСТІ ФУНДАМЕНТНОЇ ПОДУШКИ ДЛЯ ПОСИЛЕННЯ МІЦНОСТІ СЛАБКИХ ГРУНТІВ

А. І. Білеуш[†], В. Л. Фрідріхсон, О. І. Кривоног, В. В. Кривоног

*Інститут гідромеханіки НАН України,
вул. Желябова, 8/4, 03057, Київ, Україна*

[†]E-mail: igmggs@ukr.net

Отримано 11.09.2017

Актуальність питань щодо можливості будівництва на ділянках зі слабкими ґрунтами, які займають значні території України, зумовлює необхідність розробки й застосування заходів щодо посилення міцності слабких ґрунтів як основ для фундаментів. У статті наведено результати дослідження роботи армованої геосинтетичними матеріалами ґрунтової конструкції фундаментної подушки для укріплення слабких основ під фундаментами споруд. Експерименти виконувались на малорозмірних моделях, а чисельне моделювання — з використанням програмного комплексу PLAXIS. Згадана конструкція являє собою об'ємно замкнуту систему, міцність якої визначається її геометрією, міцністю геосинтетичних матеріалів, міцністю їх з'єднання, видом і щільністю заповнювача. Армована сітка розподіляє напруження по всій площі армування, забезпечуючи збільшення несучої здатності основи фундаменту і зменшуючи його деформації. У свою чергу, геотекстиль виконує функцію розділюючого шару між ґрунтом основи й заповнювачем. З огляду на те, що геосітка працює на розтяг, а ущільнений наповнювач — на стиск, наближено можна вважати, що під дією зовнішнього навантаження армовані ґрунтові конструкції імітують поведінку плити на пружній ґрунтовій основі. Результати експериментальних і чисельних досліджень нової конструкції фундаментної подушки показали, що вона зменшує деформації осідання фундаментів на (25...30)% і дозволяє скоротити витрати на будівництво в порівнянні з традиційними інженерними рішеннями. Запропоновану авторами конструкцію фундаментної подушки для посилення слабких ґрунтових основ можна застосовувати під башмаки сталевого типу збірних та монолітних залізобетонних колон, а також під стрічкові та стовпчасті фундаменти для стін у промисловому та громадському будівництві.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: конструкції «ґрунт—геотекстиль», фундаментна подушка, математична модель

1. ВСТУП

Проблема будівництва різних споруд на ділянках зі слабкими ґрунтами, які займають значні території України, є актуальною. Навантаження на основи від сучасних будівель зростають зі збільшенням поверховості споруд, що призводить до необхідності розробки й застосування заходів щодо посилення міцності слабких ґрунтів як природних основ фундаментів.

Для покращення фізико-механічних властивостей і підвищення несучої здатності слабких ґрунтів в основах фундаментів широко впроваджується метод улаштування в масиві ґрунту жорстких ґрунтобетонних елементів — «геомасивів» [1]. Геотехнічний масив («геомасив») — це система техногенних утворень, які влаштовуються в підвалинах споруди за допомогою включення в товщу ґрунту і його поверхню штучно створених елементів (ущільнених або закріплених зон і шарів, бетонних і ґрунтоцементних блоків, плит тощо). Як результат формується єдина просторова структура з високою розподіленою несучою здатністю, яка під дією тиску зазнає незначних деформацій.

У сучасному будівництві для підвищення несучої здатності слабких ґрунтів широко впроваджуються технології горизонтального і вертикального армування ґрунтів палями й ґрунтоармуючими конструкціями. Комбінації ґрунту й армуючих елементів змінюють умови деформування основи, а саме: обмежують деформування ґрунтів у вертикальному й горизонтальному напрямках і, як наслідок, підвищують загальну стійкість основи в цілому. Основним параметром для проектування «геомасиву» є забезпечення відносної різниці $i \leq (0.002 \dots 0.003)$ осідання розташованої на ній фундаментної конструкції, що гарантує механічну безпеку споруди.

На основі вивчення й детального аналізу сучасних методів і конструкцій для закріплення основ споруд були розроблені нові конструкції «ґрунт—геотекстиль» з використанням геотекстильних матеріалів, що дозволило підвищити величину навантажень, які спроможні сприймати ґрунтові основи.

При дослідженні пружно-деформованого стану ґрунтів, закріплених геотекстилем, використовувались методи фізичного та математичного моделювання. Кількісний аналіз напружено-деформованого стану запропонованих ґрунто-армованих конструкцій було виконано з використанням програмних комплексів PLAXIS і Mathcad 15. Це дозволило оцінити ефективність конструкцій та їхню оптимальну конфігурацію для заданого типу інженерно-геологічних умов, в яких перебуває основа.

2. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРУЖНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ҐРУНТІВ, ЗАКРІПЛЕНИХ КОНСТРУКЦІЯМИ «ҐРУНТ—ГЕОТЕКСТИЛЬ»

Дослідження роботи ґрунто-армованих конструкцій проводились вітчизняними і зарубіжними вченими протягом багатьох років. При цьому було вивчено особливості перерозподілу зусиль між окремими елементами системи «ґрунт—геотекстиль» у процесі статичних і циклічних навантажень. Також проведено аналіз впливу армуючих елементів на несучу здатність основи, а також на поширення напружень у ґрунті. За результатами аналізу літературних джерел можна констатувати, що ефективність армованої ґрунтової конструкції залежить, насамперед, від фізико-механічних показників матеріалу геосинтетиків, характеристик ґрунту й механізму зчеплення синтетичної арматури

з ним [2–9].

Загалом пружно-деформований стан закріплених геотекстилем ґрунтів вивчають на основі методів фізичного й математичного моделювання. Лабораторні дослідження характеристик системи «ґрунт — армуючі елементи» проводять на малорозмірних моделях у ґрунтових лотках методом наближеного моделювання. В натурних умовах згідно зі стандартом ДСТУ Б.В.2.1-7-2000 використовують штамповий метод, застосовуючи штампи площею (0.25...0.5) м² [6, 10, 11]. Велика трудомісткість цього методу обмежує його використання. Відомо, що лабораторні оцінки на (5...9)% занижують позитивний ефект армування ґрунтової конструкції у порівнянні з результатами випробувань штамповим методом в натурних умовах.

Математичне моделювання роботи ґрунто-армуючих конструкцій базується на методиках розрахунку, представлених у німецьких рекомендаціях EBGEO, британському стандарті BS 8006-1:2010, а також «Посібнику з проектування земляного полотна автомобільних доріг на слабких ґрунтах» (Російська Федерація). Кожна з названих методик має свої межі застосування, переваги й недоліки.

1. Методика EBGEO, яка регламентує застосування матеріалів з міцністю > 30 кН/м, дозволяє розрахувати зусилля в геосинтетичних матеріалах у поздовжньому й поперечному напрямках, описує виникнення арочного ефекту, спираючись на результати експериментальних досліджень. На думку фахівців, отримані за її допомогою результати прогнозують великі запаси нереалізованої міцності і подовження.
2. У британському стандарті форма арки (купола) й розподіл напружень залежать лише від типу палі і геометрії насипу, але не від параметрів ґрунту насипу та міцності геосинтетичного ростверку. Зазначмо однак, що це єдиний документ, який враховує в конструкції можливість застосування «гнучких» палі.
3. Російська методика, розроблена під керівництвом проф. В. Д. Казарновського, не дає обґрунтування появи арочного ефекту й відсікання ґрунту основи. Відповідні значення подовження геосинтетичного матеріалу й осідання міжсвайного простору виходять завищеними.

Окремо слід згадати польський стандарт ITB 429/2007, в якому наведено максимальні значення подовжень геосинтетичного матеріалу (для дорожніх насипів ця величина становить 5.0%).

На практиці роботу ґрунтоармуючих конструкцій найчастіше розраховують за допомогою моделювання у дво- і тривимірній постановці з застосуванням програмних комплексів PLAXIS 2D і 3D та Mathcad 15.

3. РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ФУНДАМЕНТНОЇ ПОДУШКИ ДЛЯ ЗАКРІПЛЕННЯ ОСНОВ СПОРУД І МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ЇЇ РОЗРАХУНКУ

3.1. Розробка конструкції фундаментної подушки, армованої геосинтетиками

Відоме інженерне рішення по влаштуванню фундаментної подушки з насипного ґрунту, пошарово армованої геосинтетичним матеріалом. Її конструкція потребує наявності



Рис. 1. Схема конструкції фундаментної подушки

траншеї на ширину, не меншу від подвійної ширини фундаменту, і на розрахункову глибину, необхідну для забезпечення заданої несучої здатності фундаментної подушки. При цьому виконують пошарове ущільнення кожного шару подушки.

Недолік такої конструкції полягає в тому, що кінці армуючої сітки з геосинтетичного матеріалу залишаються не закріпленими, а вільно укладаються в шарі насипного ґрунту. Внаслідок цього за межами фундаменту армуючий елемент не розподіляє стискаючі напруження по всій площі армування, що зменшує несучу здатність підвалин фундаменту. Крім того, улаштування такої фундаментної подушки потребує значних трудовитрат.

Запропонуємо конструкцію фундаментної подушки для посилення слабких ґрунтів основ, яку можна застосовувати під башмаки стаканого типу збірних і монолітних залізобетонних колон, а також під стрічкові та стовпчасті фундаменти для стін у промисловому та громадському будівництві тощо. Для її улаштування використовуються армуюча геосинтетична сітка, нетканий захисно-фільтруючий синтетичний матеріал і заповнювач з щебеню, відсіву, піску або місцевого ґрунту. Сітку й нетканий матеріал визначеної довжини розміщують по підлошві та бічним стінкам приямка під фундамент. Потім на них відсипають заповнювач необхідної товщини, який пошарово ущільнюють, після чого обгортають зверху нетканим матеріалом і сіткою з нашаруванням і жорсткою фіксацією їхніх кінців один на другий (Рис. 1).

Отримана система «ґрунт—геотекстиль» є собою об'ємно замкнутою конструкцією, міцність якої визначається не тільки міцністю полотна геосинтетичного матеріалу на розтяг, але й схемою з'єднання полотен, міцністю з'єднання й видом ґрунту, який знаходиться всередині полотен (у «мішку»), що значно підвищує її несучу здатність. Під дією зовнішнього навантаження фундаментна подушка працює як балка на пружній основі. Армуюча сітка розподіляє напруження по всій площі армування, що забезпечує збільшення несучої здатності підвалин фундаменту і зменшує його деформації. У свою чергу, геотекстиль виконує функцію розділяючого шару між ґрунтом основи й заповнювачем фундаментної подушки.

3.2. Розробка математичної моделі розрахунку основи споруди, що закріплена конструкцією «ґрунт-геотекстиль»

Будемо вважати, що підсилена геотекстилем конструкція основи зі щебеню працює як балка або плита на ґрунтовій основі (Рис. 2).

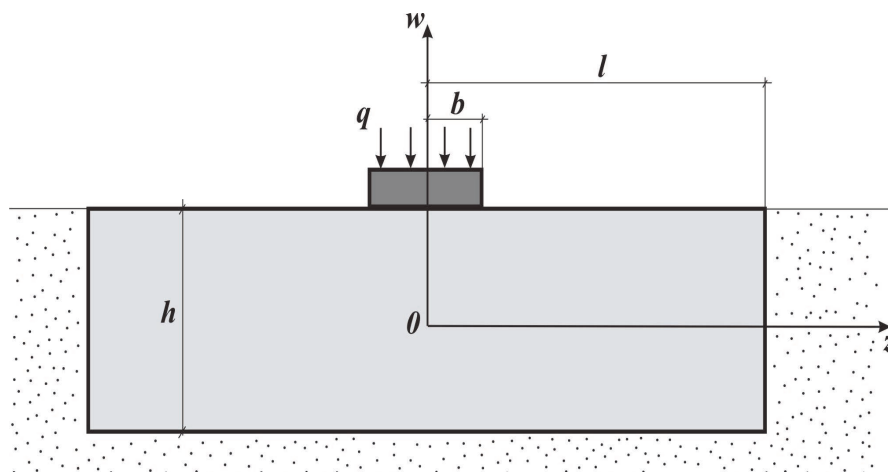


Рис. 2. Схема роботи конструкції

Диференціальне рівняння зігнутої осі балки має вигляд

$$EJ_x \frac{d^4 w}{dz^4} + \alpha z = g(z), \quad (1)$$

де J_x — момент інерції перерізу умовної балки; E — модуль пружності матеріалу, розташованого між геотекстилем; g — навантаження на умовну балку.

Друга похідна від згинального моменту $EJ_x dw^{(IV)}(z)$, яка входить у рівняння (1), дорівнює сумі всіх розподілених навантажень у перерізі z на одиницю довжини, а саме: зовнішніх силових чинників і реакції пружної основи. Коефіцієнт жорсткості пружної основи k — це сила, з якою діє пружна основа на одиницю площі нижньої поверхні балки при одиничному прогині основи (він має розмірність Н/м²).

Константи інтегрування визначаються з початкових умов деформування, які залежать від гнучкості балки. Для короткої жорсткої балки, завантаженої в центрі зосередженою силою, за одну з граничних умов можна прийняти рівність нулю похідної від прогину, а для довгої гнучкої балки — відсутність прогину на її кінцях.

Відповідні розв'язки зазвичай записують, користуючись функціями Крилова відносно безрозмірної координати:

$$\begin{aligned} Y_1(\xi) &= \operatorname{ch} \xi \cos \xi, & Y_2(\xi) &= \frac{1}{2}(\operatorname{ch} \xi \sin \xi + \operatorname{sh} \xi \cos \xi), \\ Y_3(\xi) &= \frac{1}{2}\operatorname{ch} \xi \sin \xi, & Y_4(\xi) &= \frac{1}{4}(\operatorname{ch} \xi \sin \xi - \operatorname{sh} \xi \cos \xi). \end{aligned} \quad (2)$$

Позначивши $L_{eq} = \sqrt[4]{4EJ_x/\alpha}$, отримаємо:

$$\begin{aligned}
 EJ_x w(z) = & EJ_x w_0 Y_1 \left(\frac{z}{L_{eq}} \right) + EJ_x \theta_0 L_{eq} Y_2 \left(\frac{z}{L_{eq}} \right) + \\
 & + M_0 L_{eq}^2 Y_3 \left(\frac{z}{L_{eq}} \right) + Q_0 L_{eq}^3 Y_4 \left(\frac{z}{L_{eq}} \right) + \\
 & + L_{eq}^2 \sum_{\forall l_k < z} M_k Y_3 \left(\frac{z - l_k}{L_{eq}} \right) + L_{eq}^3 \sum_{\forall l_k < z} F_k Y_4 \left(\frac{z - l_k}{L_{eq}} \right) - \\
 & - \frac{L_{eq}^4}{4} \sum_{\forall a_k < z} q_k \left(Y_1 \left(\frac{z - a_k}{L_{eq}} \right) - 1 \right) + \frac{L_{eq}^4}{4} \sum_{\forall b_k < z} q_k \left(Y_1 \left(\frac{z - b_k}{L_{eq}} \right) - 1 \right).
 \end{aligned} \tag{3}$$

Тут $EJ_x w_0$ і $EJ_x \theta_0$ — прогин кут повороту лівого перерізу (обидва з точністю до розмірного множника EJ_x); M_0 і Q_0 — згинальний момент і перерізувача сила в лівому перерізі. У першій і другій сумах l_k — точка докладання зосередженого моменту або сили; у третій і четвертій сумах a_k і b_k — початок і кінець ділянки розподіленого навантаження відповідно. У кожній із сум враховуються всі силові фактори відповідного типу, розташовані зліва від поточного перерізу.

Невідомі параметри $EJ_x w_0$, $EJ_x \theta_0$, M_0 , Q_0 знаходять з чотирьох граничних умов (по дві на кожному краї балки), склавши й розв'язавши відповідну систему лінійних рівнянь. У більшості практичних випадків для балок, які працюють на згин, необхідно також робити розрахунок на жорсткість. Під розрахунком на жорсткість розуміють оцінку пружної податливості балки під дією прикладених навантажень і підбір таких розмірів поперечного перерізу, при яких переміщення не будуть перевищувати встановлених нормами меж. Для цього необхідно обчислювати переміщення точок балки під дією певного зовнішнього навантаження. Це також необхідно робити для розрахунку статично невизначених балок.

4. ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРУЖНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОНСТРУКЦІЙ «ГРУНТ—ГЕОТЕКСТИЛЬ»

Для вивчення поведінки ґрунто-армованої конструкції фундаментної подушки під навантаженням проводилось моделювання роботи системи «плита — ґрунто-армована конструкція — ґрунт основи» (Рис. 3). Для цього було розроблено експериментальну установку — лоток з жорсткими бічними стінками з розмірами 1000 × 200 × 600 мм, облаштований пристроєм для передачі навантажень до 1000 кг на плиту моделі. При дослідженнях використовували жорсткі штампи розміром 50 × 200 мм та 80 × 200 мм. Зміну зусиль в армуючому елементі під дією навантажень фіксували за допомогою двох датчиків зусиль, з'єднаних з ним тягами. Отримані дані передавались у блок обробки й виведення інформації, яка відображалась на моніторі ПК у графічному вигляді й записувалась в окремий файл. Деформування ґрунто-армованої конструкції, а також ґрунту основи контролювалось за допомогою дев'яти датчиків переміщення годинникового типу з точністю вимірюнь 0.01 мм. Фотографію описаної установки представлено на Рис. 4.

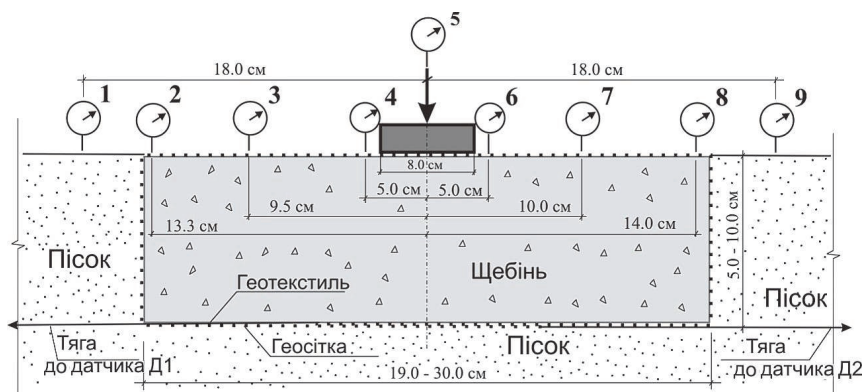


Рис. 3. Схема моделі «штамп — ґрунто-армована конструкція — ґрунт основи»



Рис. 4. Експериментальна установка під час дослідження моделей конструкції фундаментної подушки

В експериментах роль ґрунту основи виконував середньозернистий пісок. У якості заповнювача фундаментної подушки використовували щебінь фракції 10,0...20,0 мм, відсів та середньозернистий пісок, гранулометричний склад яких наведено на Рис. 5. Навантаження на модель задавали ступенями від 300 до 1600 кН/м². Показники датчиків зміщень і зусиль фіксували після їх стабілізації. Після завершення кожного дослідження модель конструкції виймали з лотка разом з піском. Потім пісок засипали назад без ущільнення. Таким чином досягали стабільності характеристик основи моделі у всіх досліджах.

Було проведено серії дослідів з моделями фундаментної подушки, які мали розміри

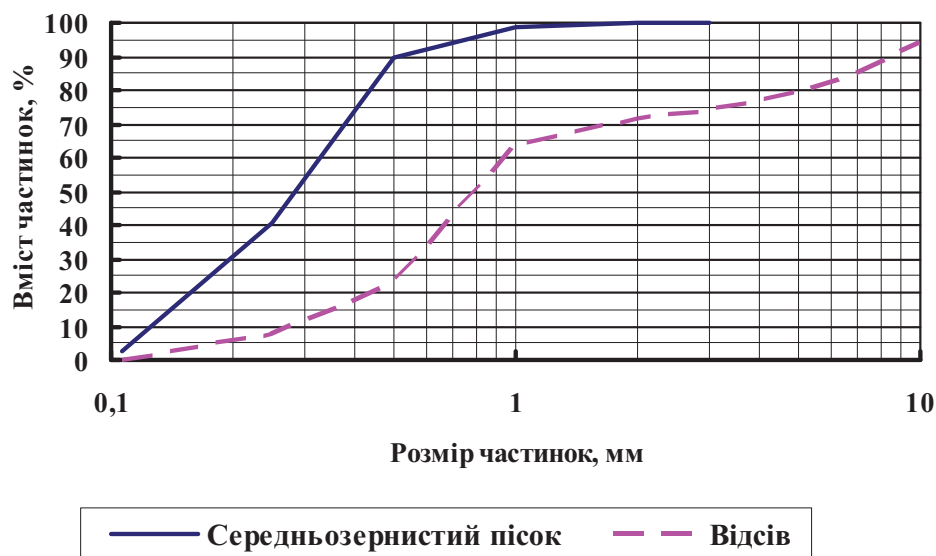


Рис. 5. Гранулометричний склад ґрунтів, які використовували при проведенні досліджень

30.0 × 10.0, 19.0 × 10.0 і 24.0 × 5.0 см (не менше, ніж по три досліди з кожною з них). Для подальшого аналізу бралися середні значення переміщень по кожній серії. На Рис. 6 показані фотографії моделі фундаментної подушки під час її закладання і дослідження.

На Рис. 7 представлено результати дослідження моделі розробленої конструкції фундаментної подушки з заповнювачем — щебенем фракції 10...20 мм шириною 30 см, а на Рис. 8 — результати дослідження аналогічної за розмірами моделі традиційної конструкції фундаментної подушки зі щебеню цієї ж фракції, армованої смужками геосинтетичного матеріалу. На Рис. 9 наведено порівняння результатів досліджень моделей обох конструкцій з однаковими розмірами при тиску $P = 1330 \text{ кН/м}^2$. З графіка видно, що при розроблена нами конструкція фундаментної подушки зменшує деформації осідання на (25...30)% у порівнянні з традиційною конструкцією.

5. ЧИСЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ «ҐРУНТ—ГЕОТЕКСТИЛЬ» В ОСНОВАХ СПОРУД

Міцність конструкцій «ґрунт—геотекстиль» визначається міцністю геосинтетичного матеріалу, інженерно-геологічними й гідрогеологічними умовами ділянки забудови, навантаженнями на систему «ґрунт—геотекстиль» та її конструктивними особливостями. Цим питанням присвячено ряд робіт, у яких вивчалась робота геотекстилю в ґрунті, підсиленому окремими шарами геосинтетичного матеріалу [4, 12]. У нашому випадку міцнісні характеристики запропонованої конструкції фундаментної подушки, окрім міцності полотна геосинтетичного матеріалу на розтяг, визначаються також схемою й міцністю з'єднання полотен і видом ґрунту, який знаходиться всередині них. Тому до визначення механічних параметрів системи «ґрунт—геотекстиль» в цілому необхідно підходити комплексно.

Теоретичні дослідження роботи різних варіантів моделей конструкцій «ґрунт—геотекстиль», було проведено за допомогою аналітичних і чисельних методів з використанням програмних комплексів PLAXIS та «Mathcad 15». Як результат встановлено, що



Рис. 6. Модель фундаментної подушки:
а — під час закладання, б — під час дослідження

у випадку коли довжина конструкції «ґрунт-геотекстиль» у (2.0...2.5) рази перевищує її товщину, несуча здатність основи збільшується в середньому на (10...15)%.

На Рис. 10–13 наведено приклади розрахунків пружно-деформованого стану моделей конструкцій «ґрунт–геотекстиль», виконаних на ПК за допомогою програмного комплексу PLAXIS. Дані про розміри й конструктивні особливості розрахункових схем узяті з матеріалів лабораторних експериментів. На графіках показано характер деформування розрахункової сітки моделі, пружно-деформований стан, епюри зусиль у сітці конструкцій «ґрунт–геотекстиль», а також переміщення моделі. Для окремих розрахунків було виконано співставлення даних, отриманих при дослідженні конструкції в лабораторних умовах, з числовими результатами.

Співставлення переміщень умовної балки, визначених за даними розрахунків на основі співвідношень (3) з використанням програмного комплексу Mathcad 15, та експериментальними даними для чотирьох величин навантажень P наведено на Рис. 14. Розбіжність між отриманими експериментальними та розрахунковими даними коливалась у межах від 2 до 20%.

6. ПРИКЛАДИ КОНСТРУКЦІЙ ФУНДАМЕНТНОЇ ПОДУШКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ПО ЇХ РОЗРАХУНКУ

6.1. Приклади конструкцій фундаментів споруд з застосуванням розробленої конструкції

При проектуванні й будівництві фундаментів споруд необхідно враховувати вимоги ДБН В.2.1-10-2009 [13]. Під час закладання фундаментів споруд на слабкій основі виникає потреба вдаватися до улаштування штучного міцного несучого шару ґрунту, правильно підібрана товщина якого забезпечує неможливість проявів місцевих зсувів і нерівномірного його ущільнення по довжині фундаменту. В залежності від рівня ґрунтових вод і гідрогеологічних умов, фундаментна подушка з наповнювачем зі щебеню чи гравію може служити також фільтрувальною підсіпкою для пристінного дренажу, що збільшує його водоприймальну здатність у слабопроникних ґрунтах, або водозабірним елементом пластового дренажу, гідравлічно поєднаним з трубчастою дреною

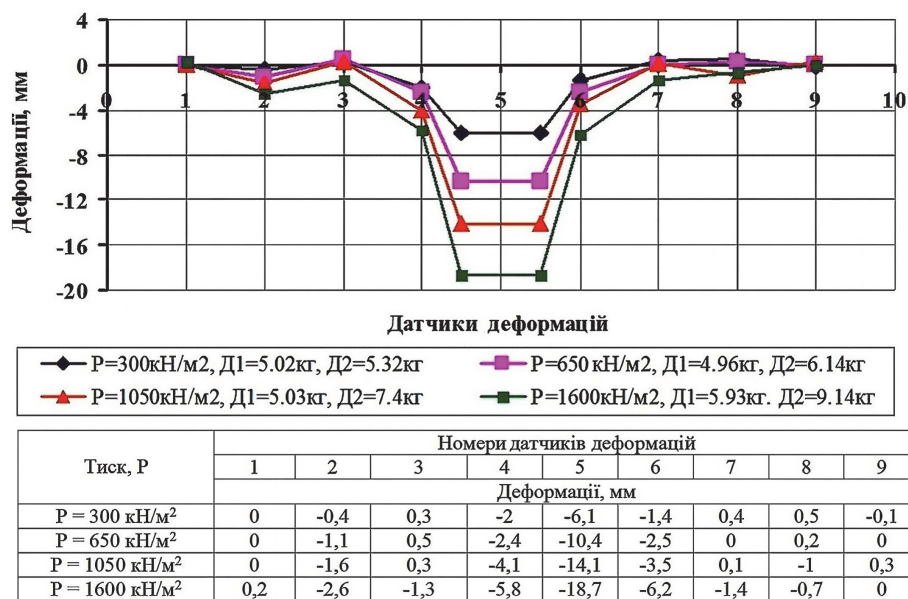


Рис. 7. Результати дослідження моделі розробленої фундаментної подушки розміром 30.0 × 10.0 см

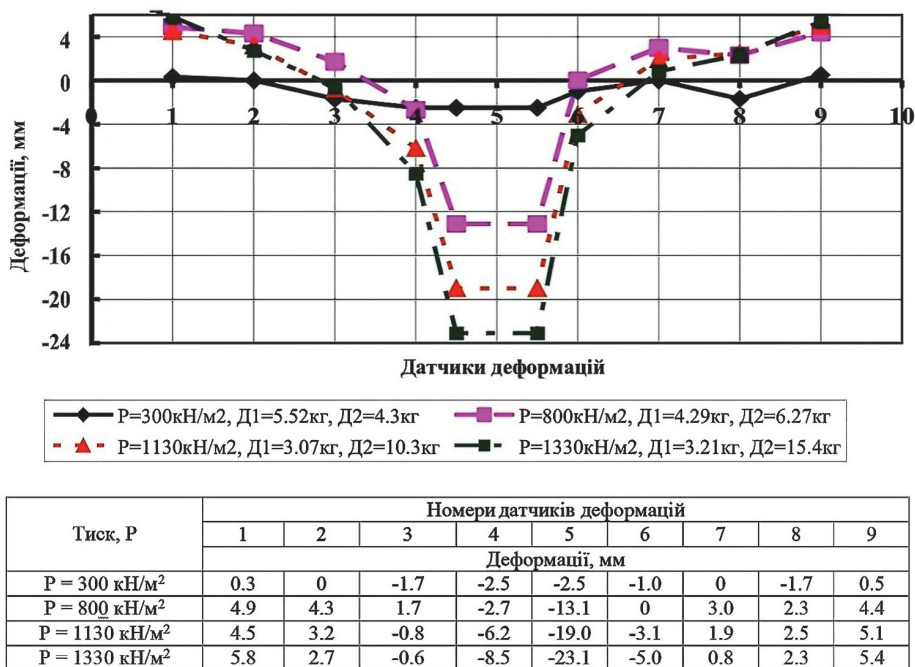


Рис. 8. Результати дослідження моделі фундаментної подушки розміром 30.0 × 10.0 см зі щелею, армованого смужками геосинтетичного матеріалу



Рис. 9. Порівняння результатів досліджень моделей фундаментних подушок

пристінного дренажу.

На Рис. 15–17 наведено ескізи конструкцій прямокутного та стовпчастого стрічкового фундаментів, які опираються на фундаментну подушку запропонованого типу, яка виконує функцію штучного несучого шару ґрунту. На Рис. 18 показано конструкцію фундаментної подушки з бетону, в якій роль арматури відіграє сітка з геотекстильного матеріалу [14, 15].

6.2. Рекомендації щодо розрахунку

Основними факторами роботи конструкцій «ґрунт–геотекстиль» є навантаження, зусилля в перерізах, деформації, переміщення окремих перерізів. При цьому навантаження й деформації виступають у ролі активних факторів. При розрахунку систем типу «ґрунт–геотекстиль» основною задачею є визначення зусиль в окремих елементах при відомих навантаженнях. Зауважимо, що на практиці розрізняють загальну міцність — здатність всієї конструкції витримувати навантаження без руйнування, а також місцеву міцність — здатність витримувати навантаження без руйнування окремих з'єднань. У механіці конструкцій «ґрунт–геотекстиль» один з ключових моментів полягає в з'єднанні полотен між собою.

Як видно з розв'язків, отриманих за допомогою програмного комплексу PLAXIS (див. Рис. 11), найбільша величина зусилля, що розтягує та розриває армуючу сітку й геотекстиль, спостерігається в точці по центру плити фундаментної подушки, показаної на Рис. 2. Виходячи з цих даних і співвідношень (3), що визначають пружно-деформований стан конструкції «ґрунт-геотекстиль» в основі споруд, зауважимо, що сумарна загальна міцність на розтяг сітки і геотекстилю в конструкції для підсилення

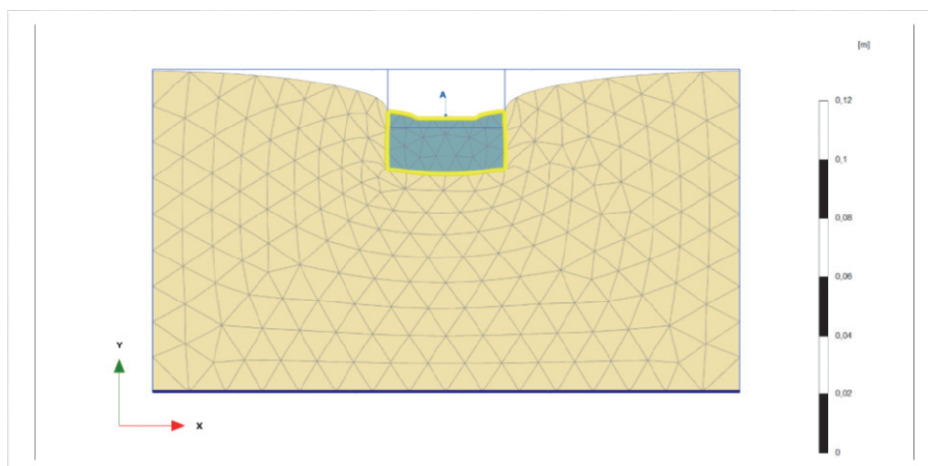


Рис. 10. Деформація сітки моделі конструкції «ґрунт—геотекстиль» розміром 19.0 × 10.0 см (за даними програмного комплексу PLAXIS)

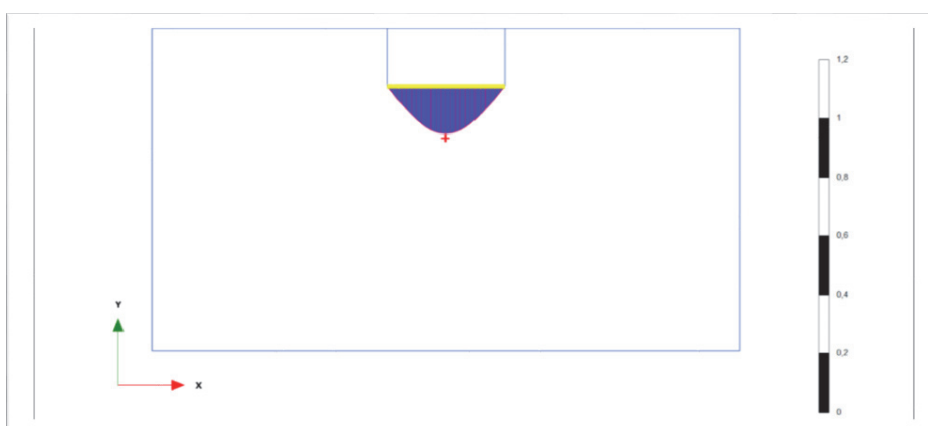


Рис. 11. Епюра зусилля в нижній частині сітки моделі конструкції «ґрунт—геотекстиль» розміром 19.0 × 10.0 см (за даними програмного комплексу PLAXIS)

слабкої основи повинна бути не менше величини, яку визначено на основі виразу:

$$F_1 = \frac{2x_8}{h}, \quad (4)$$

де F_1 — розрахункове зусилля на розтяг сітки і геотекстилю, визначене з формули (4) з урахуванням коефіцієнта надійності по навантаженню (для реальних проектів воно може визначатись з урахуванням реальних інженерно-геологічних умов як найбільше зусилля в геосітці, розраховане за допомогою програмного комплексу PLAXIS); h — товщина фундаментної подушки; x_8 — величина константи, яку визначають на основі рішень восьми алгебраїчних рівнянь, отриманих з рівнянь (3) і граничних умов задачі.

$$F_1 \leq \frac{\gamma_c}{\psi \gamma_n} R, \quad (5)$$

ψ — коефіцієнт поєднання навантажень (для основного поєднання $\psi = 1$, для особливого $\psi = 0.9$, для навантажень будівельного періоду $\psi = 0.95$); γ_c — коефіцієнт умов

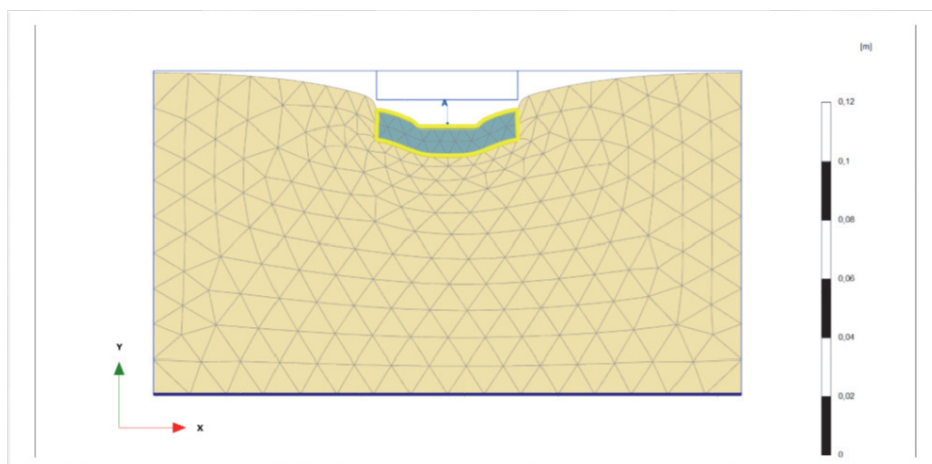


Рис. 12. Деформація сітки моделі конструкції «ґрунт—геотекстиль» розміром 24.0×5.0 см (за даними програмного комплексу PLAXIS)

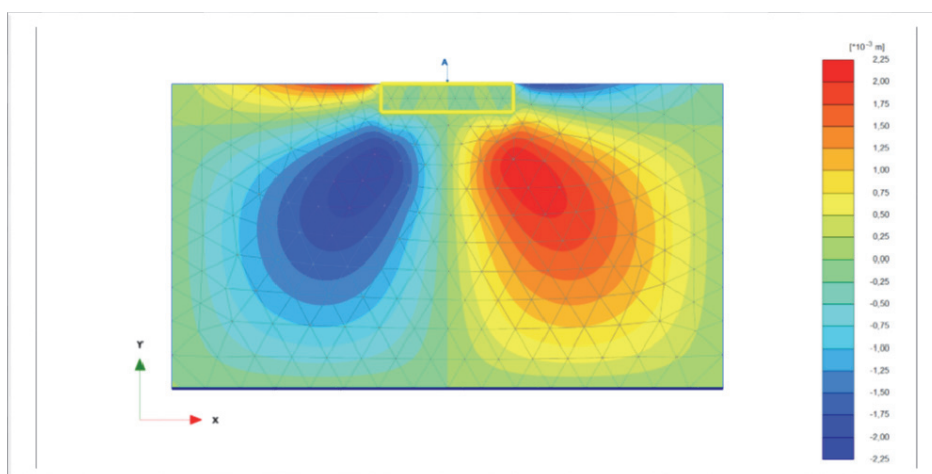


Рис. 13. Епіюра вертикальних напружень в моделі конструкції «ґрунт—геотекстиль» розміром 24.0×5.0 см (за даними програмного комплексу PLAXIS)

роботи, який враховує вид граничного стану, ступінь точності вихідних даних, припущення розрахункової схеми, тип споруд, якість матеріалів та інші фактори (величина γ_c визначається нормативними документами); γ_n — коефіцієнт надійності, відповідно до призначення споруди (його приймають рівним у межах $(1.2 \dots 1.1)$ в залежності від ступеню відповідальності захисної споруди); R — сумарна міцність на розтяг сітки й геотекстилю, визначена з технічних характеристик чи експериментальних даних.

Місцеву міцність з'єднання геосітки визначають на основі виразу

$$F_2 \leq \frac{\gamma_c}{\psi \gamma_n} R_1, \quad (6)$$

де F_2 — розрахункове зусилля на розтяг у з'єднанні сітки й геотекстилю між собою (визначається при моделюванні реальної задачі закріплення ґрунтів в основі з використанням програмного комплексу PLAXIS. У першому наближенні при проектуванні

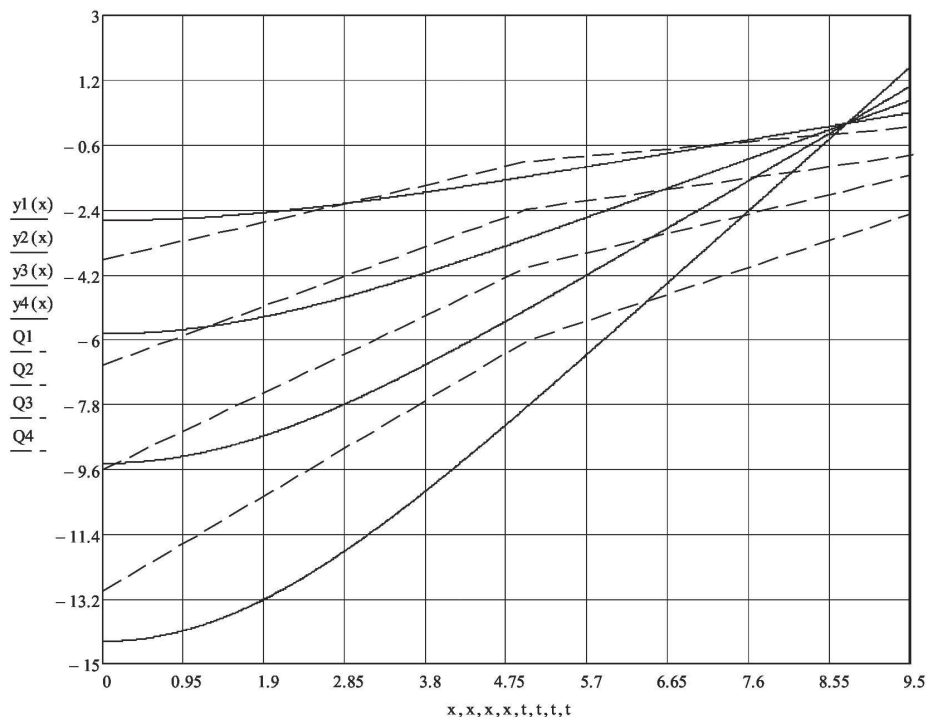


Рис. 14. Співставлення переміщень умовної балки

конструкції «ґрунт—геотекстиль» допускається приймати $F_2 = F_1$); R_1 — сумарна міцність на розтяг з'єднань сітки і геотекстилю, визначена на основі експериментальних даних;

7. ВИСНОВКИ

1. Розроблено конструкцію фундаментної подушки під фундаменти споруд, яка зменшує деформації осідання на (25...30)% і дозволяє скоротити витрати на будівництво в порівнянні з традиційними інженерними рішеннями.
2. На виготовленій дослідній установці проведено серію дослідів для кількісного оцінювання пружно-деформованого стану малорозмірних моделей ґрунто-армованих конструкцій під дією статичних вертикальних навантажень.
3. Розроблено математичну модель і проведено чисельне моделювання роботи ґрунто-армованих конструкцій в основах споруд у двовимірній постановці з застосуванням програмного комплексу PLAXIS 2D.
4. Проведено серію розрахунків для оцінки пружно-деформованого стану ґрунто-армованих конструкцій в основах споруд на базі розроблених математичних залежностей з використанням програмного комплексу Mathcad 15. Виконано співставлення отриманих результатів з експериментальними даними.
5. За матеріалами проведених досліджень отримано два патенти України й одне позитивне рішення на видачу декларативного патенту.

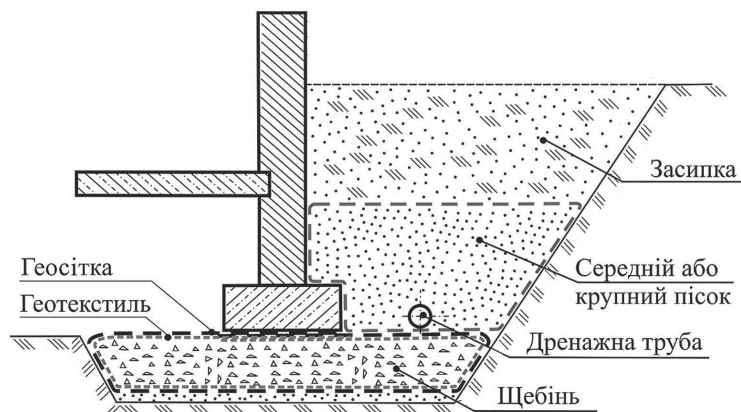


Рис. 15. Конструкція прямокутного стрічкового фундаменту з геормованою фундаментною подушкою

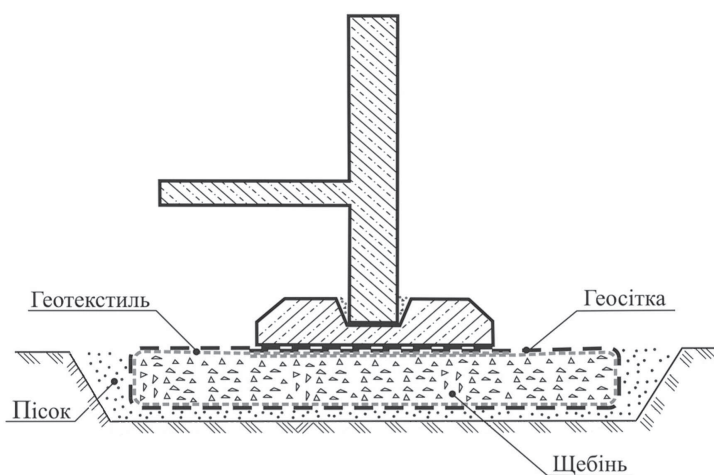


Рис. 16. Конструкція стовпчастого фундаменту з геормованою фундаментною подушкою

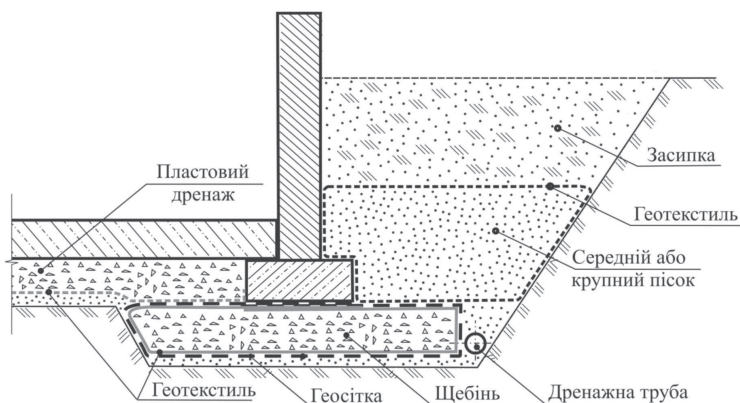


Рис. 17. Конструкція прямокутного стрічкового фундаменту з геормованою фундаментною подушкою, яка поєднана з пластовим дренажем

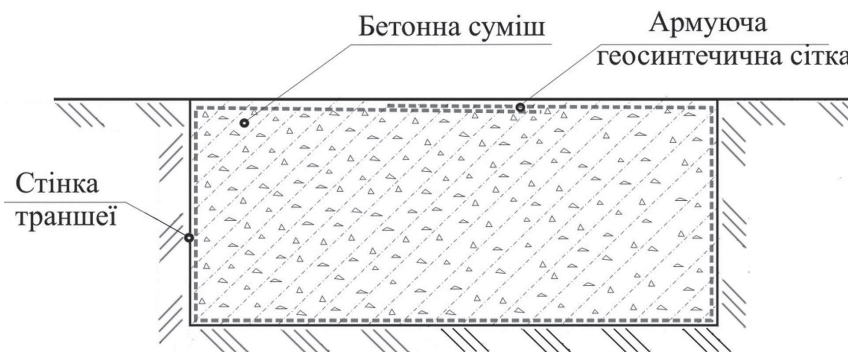


Рис. 18. Конструкція фундаментної подушки з бетону та армуючою сіткою з геосинтетичного матеріалу

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Маковецкий О. А., Серебренникова Д. К. Проектирование армирования грунтового основания. «Метод геомассива» // Материалы научно-технической конференции с международным участием Палеотип. — Москва, 2013. — С. 123–127.
- [2] Савенко В. Я., Петрович В. В., Чечуга О. С. Шляхи подальшого впровадження геосинтетиків у практику дорожнього будівництва // Автошляховик України. — 2001. — № 3. — С. 35–38.
- [3] Трайков Б. С. Синтетические текстильные материалы в конструкциях автомобильных дорог. — Москва : Труды СоюздорНИИ, 1983. — С. 66–73.
- [4] Армовані основи будівель та споруд / М. Ф. Друкований, С. В. Матвеев, Б. Б. Корчевський та ін. — Вінниця : УНІВЕРСУМ, 2006.
- [5] Корчевський Б. Б. Горизонтальні армовані основи під фундаменти будівель. — Вінниця : УНІВЕРСУМ, 2004.
- [6] Бугаєва С. В., Баранова А. А. Армування ґрунту геотекстильними матеріалами // Збірник наукових праць. — 2013. — Т. 1, № 3 (38). — С. 75–81. — Полтава.
- [7] Мирсаянов Н. Т., Хабибуллин Р. С. Особенности поведения армированных грунтовых оснований при циклическом нагружении // Материалы научно-технической конференции с международным участием Палеотип. — Москва, 2013. — С. 45–49.
- [8] Мирсаянов Н. Т. Оценка прочности и деформативности армированных грунтовых оснований // Геотехника. — 2010. — № 4. — С. 58–67.
- [9] Приходько А. П. Экспериментальные исследования грунто-армированной конструкции // Материалы научно-технической конференции с международным участием Палеотип. — Москва, 2013. — С. 68–72.
- [10] Ґрунти. Методи польового визначення характеристик міцності та деформативності. ДСТУ Б.В.2.1-7-2000 (ГОСТ 20276-99). — Стройиздат. — 1999.

- [11] Корнієнко М. В., Янзвінський О. В. Комплексна оцінка вивчення модуля деформації ґрунту польовими та лабораторними методами // *Механіка ґрунтів, геотехніка та фундаментобудування*. — 2013. — Т. 79. — С. 72–79.
- [12] Заворицький В. Й., Петрович В. В., Каськів В. І. Обґрунтування можливості й доцільності застосування геотекстилю в ґрунтових масивах // *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. — 1996. — Т. 53. — С. 3–15.
- [13] Державні будівельні норми України В.2.1-10-2009 «Основи та фундаменти споруд». — Київ : Мінрегіонбуд, 2009.
- [14] Фундаментна подушка : Патент 68227 Україна / А. І. Білеуш, В. І. Сімаков, В. Л. Фрідріхсон ; Інститут гідромеханіки НАН України ; — 26.03.2012.
- [15] Спосіб виготовлення фундаментної подушки : Патент 72482 Україна / А. І. Білеуш, В. І. Сімаков, В. Л. Фрідріхсон ; Інститут гідромеханіки НАН України ; — 27.08.2012.

REFERENCES

- [1] O. A. Makoveckii and D. K. Serebrennikova, “Design of arming of the soil base. “A geomassif method”,” in *Proceedings of the Scientific and Engineering Conference with International Particpance “Paleotip”*, (Moscow), pp. 123–127, 2013.
- [2] V. Y. Savenko, V. V. Petrovych, and O. S. Chechuga, “Ways of further implementation of geosynthetics to road construction practice,” *Avtoshlyahovyk Ukrainy*, no. 3, pp. 35–38, 2001.
- [3] B. S. Traikov, *Synthetic textile materials in the construction of highways*, ch. Development of methods for testing road textile materials, pp. 66–73. Moscow: Trudy SoyuzdorNII, 1983.
- [4] M. F. Drukovanyi, S. V. Matveev, B. B. Korcheckii, V. I. Ryndiuk, V. G. Cherny, and V. S. Shokarev, *Armed foundations of building and constructions*. Vinnytsia: UNIVERSUM, 2006.
- [5] B. B. Korcheskii, *Horizontal bases for building foundations*. Vinnytsia: UNIVERSUM, 2004.
- [6] S. V. Bugaeva and A. A. Baranova, “Arming of the soil by geotextile materials,” *Zbirnyk Naukovykh Prac*, vol. 1, no. 3 (38), pp. 75–81, 2013. Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University.
- [7] N. T. Mirsayanov and R. S. Habibullin, “Specific behavior of armed soil bases at cyclic loading,” in *Proceedings of the Scientific and Engineering Conference with International Particpance “Paleotip”*, (Moscow), pp. 45–49, 2013.
- [8] N. T. Mirsayanov, “Estimating the strength and deformability of armed soil bases,” *Geotekhnika*, no. 4, pp. 58–67, 2010.

- [9] A. P. Prihod'ko, "Experimental studying of armed soil construction," in *Proceedings of the Scientific and Engineering Conference with International Participance "Paleotip"*, (Moscow), pp. 68–72, 2013.
- [10] "Soils. Methods of field determination of strength and deformability characteristics. DSTU B.V.2.1-7-2000 (GOST 20276-99)." Stroyizdat, 1999.
- [11] M. V. Kornienko and O. V. Yanzvinskii, "Complex estimate of studying of soil deformation module by field and laboratory methods," *Mehanika Gruntiv, Geotekhnika ta Fundamentobuduvannya*, vol. 79, pp. 72–79, 2013.
- [12] V. Y. Zavorickii, V. V. Petrovych, and V. I. Kaskiv, "Substantiating the possibility and expedience of geotextiles use in soil massifs," *Avtomobilni Dorogy i Dorozhnie Budi-vnyctvo*, vol. 53, pp. 3–15, 1996.
- [13] *State construction normative of Ukraine V.2.1-10-2009 "Bases and foundations of constructions"*. Kyiv: Minregionbud, 2009.
- [14] A. I. Bileush, V. I. Simakov, and V. L. Fridrihson, "A foundation cushion," 2012. Patent of Ukraine no. 68227.
- [15] A. I. Bileush, V. I. Simakov, and V. L. Fridrihson, "A method of fabricaton of a foundati-on cushion," 2012. Patent of Ukraine no. 72482.

А. И. Билеуш, В. Л. Фридрихсон, А. И. Кривоног, В. В. Кривоног
Исследование работы конструкции «грунт—геотекстиль» в качестве
фундаментной подушки для усиления прочности слабых грунтов

Актуальность вопросов, касающихся возможности строительства на участках со слабыми грунтами, занимающими значительные территории Украины, обуславливает необходимость разработки и применения мер по усилению прочности слабых грунтов как оснований для фундаментов. В статье приведены результаты исследования работы армированной геосинтетическими материалами грунтовой конструкции фундаментной подушки для укрепления слабых оснований под фундаментами сооружений. Эксперименты выполнялись на малоразмерных моделях, а численное моделирование — с использованием программного комплекса PLAXIS. Упомянутая конструкция представляет собой объемно-замкнутую систему, прочность которой определяется ее геометрией, прочностью геосинтетических материалов, прочностью их соединения, видом и плотностью заполнителя. Армирующая сетка распределяет напряжения по всей площади армирования, что обеспечивает увеличение несущей способности основания фундамента и уменьшает его деформации. В свою очередь, геотекстиль выполняет функцию разделяющего слоя между грунтом основания и заполнителем. Учитывая то, что геосетка работает на растяжение, а уплотненный наполнитель — на сжатие, приближенно можно считать, что под действием внешней нагрузки армированные грунтовые конструкции имитируют поведение плиты на упругом грунтовом основании. Результаты экспериментальных и численных исследований новой конструкции фундаментной подушки показали, что она уменьшает деформации осадки фундаментов на (25...30)% и

позволяет сократить затраты на строительство по сравнению с традиционными инженерными решениями. Предложенную конструкцию фундаментной подушки для усиления слабых грунтовых оснований можно применять под башмаки стаканного типа сборных и монолитных железобетонных колонн, а также под ленточные и столбчатые фундаменты для стен в промышленном и гражданском строительстве.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: конструкции «грунт–геотекстиль», фундаментная подушка, математическая модель

A. I. Bileush, V. L. Fridrihson, O. I. Krivonog, V. V. Krivonog
**Studying the “soil-geotextiles” construction as a foundation cushion for
enhancement of strength of weak soils**

Topical issues concerning possible construction in the areas with low load-bearing capacity soils occupying a large part of Ukraine call for the design and implementation of the measures to enhance the strength of soft soils as a foundation basis. The paper deals with the results of the study of the work of a ground construction of a foundation cushion reinforced with geosynthetic materials to strengthen the weak bases under the foundations of the structures. The experiments were conducted using the small-scale models, and the numerical modeling was performed with the use of a software complex PLAXIS. The above-mentioned construction is a volume-closed system the strength of which is determined by its geometry, the strength of geosynthetic materials, strength of their connection, type and density of the aggregate. The reinforcing mesh distributes the stresses over the entire area of reinforcement providing the increase in the bearing capacity of the base of the foundation and reducing its deformation. In turn, geotextiles perform the function of separating the layer between the base soil and the aggregate. Considering that the geogrid works in tension and the compacted aggregate works in compression, one could take that the reinforced soil structures under the influence of an external load imitate the behavior of the slab on an elastic soil foundation. The results of experimental and numerical studies show that the new construction of the foundation cushion reduces the foundation deformations for (25...30)% and provides the reduction of construction costs in comparison with traditional engineering solutions. The proposed design of the foundation cushion can be used to strengthen weak soil foundations for staple-type shoes of prefabricated and monolithic reinforced concrete columns, as well as for strip and column foundations for walls in the industrial and civil construction.

KEY WORDS: the “soil-geotextiles” construction, a foundation cushion, mathematical model