

Ю. Л. ВИННИКОВ, М. О. ХАРЧЕНКО, В. І. МАРЧЕНКО (Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка)

РОЗРАХУНОК ФУНДАМЕНТНОЇ ПЛИТИ СИЛОСІВ НА АРМОВАНІЙ СТОХАСТИЧНІЙ ОСНОВІ

Визначено допустиму нерівномірність завантаження двох зерносховищ силосного типу, що мають спільну фундаменту плиту на слабкій основі, при не перевищенні якого крен споруди буде в межах норм. З цією метою проведено чисельне моделювання напружено-деформованого стану (НДС) слабкої основи, яка армована вертикальними ґрунтоцементними елементами (ВГЦЕ), фундаментної плити силосів у просторовій постановці методом скінчених елементів (МСЕ). При цьому застосована в якості моделі ґрунту Hardening Soil Model (HSM) з параметрами, які підібрані на базі натурних геодезичних спостережень за осіданням армованої основи плити. Дана модель адекватно описує НДС основи як на етапах завантаження, так і розвантаження.

Імітаційним моделюванням НДС армованої ВГЦЕ основи фундаментної плити МСЕ знайдені статистичні параметри осідання та крену плити. На базі цих даних для рівня надійності $p = 0,9$ підібрано мінімально необхідний процент армування основи ВГЦЕ ($i = 19\%$).

Ключові слова: фундаментна плита, слабка основа, армування, осідання, крен, імітаційне моделювання

Вступ

Однією із найважливіших проблем експлуатації зерносховищ силосного типу є забезпечення осідань і крену споруди в межах нормативних значень, особливо у складних інженерно-геологічних умовах [1, 2]. З досвіду будівництва зерносховищ на слабких ґрунтах автори рекомендують покращувати їх характеристики міцності та деформативності армуванням ВГЦЕ [3–5]. Такий інженерний захід дає можливість зменшити абсолютні середні осідання та крен споруди, тобто підвищити її експлуатаційну надійність.

Постановка задачі

Ґрунтова основа в межах стиснутої товщі фундаментної плити являє собою випадкове поле зі стохастичними властивостями. Тому напруження та деформації основ фундаментів – це просторово-часові випадкові поля, властивості яких залежать від неоднорідності ґрунтового масиву, а також просторових і часових флуктуацій зовнішніх навантажень і впливів [4–21].

Влаштування ВГЦЕ ускладнює аналітичний опис імовірнісного процесу деформування основи. Ще однією проблемою являється циклічність завантаження силосів, що призводить до постійної зміни НДС основи і, в свою чергу, на імовірнісний опис даного процесу. Тому для розв'язання даної проблеми необхідно створити адекватну чисельну модель споруди та армованої основи з урахуванням випадкових ве-

личин (ВВ) характеристик ґрунту й елементів армування та виконати імітаційне статистичне моделювання на всіх етапах зведення та експлуатації споруди.

Аналіз останніх досліджень

Питаннями статистичного аналізу та імовірнісного розрахунку при вирішенні ряду геотехнічних задач займалися, G. Baecher, R. Bea, P. Bjerager, J. Christian, J. Duncan, G. Fenton, D. Griffiths, M. Harr, M. Huber, F. Kulhawy, S. Lacasse, B. Look, G. Meyerhof, N. Morgenstern, F. Nadim, K. Phoon, A. Rechenmacher, K. Ronold, Tang, E. Vanmarke, T. Vick, R. Whitman, J. Won, T. Wu, та ін. [6–11]. Чисельні рішення геотехнічних задач за допомогою МСЕ з імовірнісним підходом виконують S. Baars [12] G. Peschl, H. Schweiger, R. Pottler, R. Thurner, M. Hicks, H. Bakker, P. Waarts [13–21].

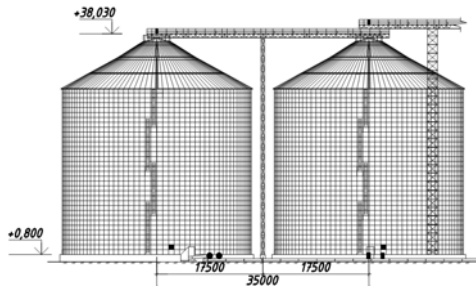
Мета досліджень

За мету роботи прийнято – виконати чисельне моделювання НДС армованої основи плитного фундаменту силосів з урахуванням циклічності їх завантаження в імовірнісній постановці для визначення критичних значень нерівномірності завантаження, при яких крен буде в межах норм. Для рівня надійності $p = 0,9$ підібрати мінімально необхідний процент армування основи ВГЦЕ.

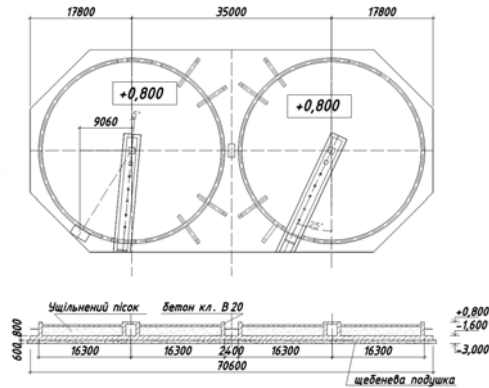
Об'єкт досліджень

Об'єктом дослідження є зерносховище з 2 силосів об'ємом 24121 м^3 кожен (20000 т зерна), які являють собою циліндричні ємності виготовлені зі сталевих листів хвилястого профілю, що з'єднані болтами (рис. 1, а, б). Місце будівництва – с. Івківці Прилуцького району Чернігівської області. Інженерно-геологічні умови майданчика зведення силосів (рис. 1, в) на глибину до 13 м характеризуються стисливими глинистими ґрунтами (табл. 1).

а)



б)



в)

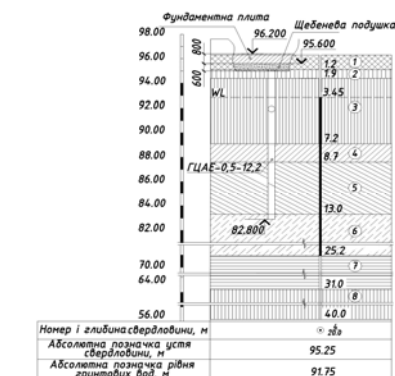


Рис. 1. Загальний вигляд зерносховища силосного типу об'ємом 24121 м^3 кожен (20000 т зерна):

а) – фасад; б) – план на позначці +0,800 і розріз по плиті; в) – інженерно-геологічний розріз

Згідно з аналітичними розрахунками для зменшення абсолютних осідань даної споруди в цих інженерно-геологічних умовах прийнято

рішення влаштувати фундаментну плиту на армованій ВГЦЕ основі на 12 м нижче її підшви. Для забезпечення необхідних характеристик міцності та деформативності основи процент її армування склав приблизно 25 %. При цьому діаметр ВГЦЕ прийнято 0,5 м, а їх крок – 0,9 і 0,95 м.

Згідно з дослідженнями проф. М. Л. Зоценка та ін. [3] значення питомого зчеплення армованого масиву приймалось як середньозважене між характеристиками ґрунту та ґрунтоцементу, а кута внутрішнього тертя – не змінювалось. Розрахункові значення модуля деформації ґрунтоцементу прийнято $E_{sc} = 180 \text{ МПа}$, а питомого зчеплення – $c_{sc} = 100 \text{ кПа}$. Розраховані значення механічних характеристик армованого ґрунтового масиву наведені у табл. 2. Для рівномірної передачі тиску на армовану основу між нею та плитою проектом передбачене влаштування проміжної подушки зі щебеню фракції 20...40 мм товщиною 0,5 м.

Таблиця 2

Розраховані значення механічних характеристик армованого ґрунтового масиву основи

№ з/п	Номер ІГЕ	Питома вага ґрунту γ , кН/м^3	Питоме зчеплення c , кПа	Кут внутрішнього тертя φ , град	Модуль деформації E , МПа
1	ІГЕ-2	18,5	39,5	18	49,0
2	ІГЕ-3	19,4	35,0	21	50,8
3	ІГЕ-4	18,5	34,3	20	50,0
4	ІГЕ-5	19,0	35,8	22	51,5

На рис. 2 подано фотографію процесу влаштування армованої основи спеціальним обладнанням на майданчику будівництва. Підрядною організацією проведено штампові випробовування армованої основи, результати яких відповідають розрахованим (див. табл. 2).



Рис. 2. Влаштування вертикальних ґрунтоцементних елементів на майданчику будівництва

Фізико-механічні характеристики ґрунтів

Номер шару	Найменування ґрунту	Питома вага ґрунту γ (кН/м ³)	Вологість W	Число пластичності I_p	Показник текучості I_L	Питоме зчеплення c_{II} (кПа)	Кут внутрішнього тертя φ_{II} (град)	Модуль деформації E (МПа)
1	Насипний ґрунт	15,0	-	-	-	-	-	-/-
2	Суглинок з домішками органічних речовин	17,0	0,2	0,10	0,10	20	18	6
3	Суглинок	18,8	0,22	0,10	0,30	14	21	9
4	Суглинок	18,5	0,28	0,15	0,40	13	20	8
5	Суглинок	19,0	0,22	0,10	0,30	15	22	10
6	Супісок	19,1	0,18	0,06	0,50	7	23	15
7	Глина	19,3	0,25	0,20	0,20	40	19	26
8	Суглинок	19,2	0,23	0,08	0,63	20	20	19

Результати досліджень

Після зведення конструкцій зерносховища проведено первинне завантаження-розвантаження силосів. Його виконують для рівномірного обтиснення конструкцій та основ силосів, недопущення перекосів споруди та перенапружень її окремих елементів, забезпечення найбільш сприятливого режиму завантаження.

Для контролю осідань основи фундаментів при первинному завантаженні-розвантаженні здійснено геометричне нівелювання III класу точності. Осідання визначалося за марками, влаштованими за периметром споруди силосу (по чотири марки на кожному силосі), у процесі завантаження, а потім – розвантаження. За результатами нівелювання в подальшому дослідженні підбиралися параметри скінченно-елементної просторової моделі основи.

Результати чисельного моделювання

Чисельне моделювання НДС армованої ВГЦЕ основи плитного фундаменту силосів виконано у програмному комплексі PLAXIS 3D FOUNDATION MCE в просторовій постановці. Розрахункова схема конструкції плити та її основи відповідає положенням будівельної механіки та механіки ґрунтів. При цьому в якості моделі ґрунту прийнято HSM з параметрами, які підібрані за результатами натурних геодезичних спостережень за осіданням армованої

основи фундаментної плити. Дана модель адекватно описує НДС основи як на етапах завантаження, так і розвантаження. На рис. 3 наведено графіки осідань основи при первинному завантаженні (на 50 %) й розвантаженні за даними геодезичних спостережень і чисельного моделювання.

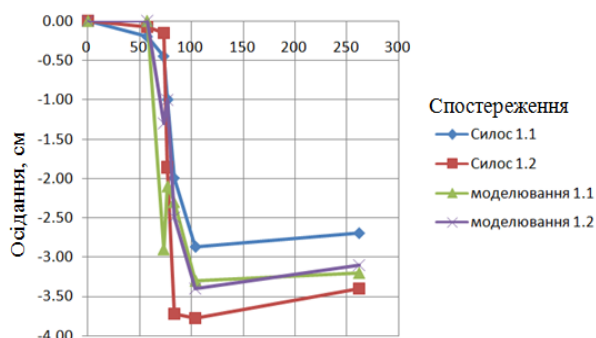


Рис. 3. Графіки осідань основи в часі за даними геодезичних спостережень і моделювання

Для застосування моделі HSM необхідно задати сім основних вихідних параметрів: φ – кут внутрішнього тертя; c – питоме зчеплення; ψ – кут дилатансії; E_{so}^{ref} – січний модуль деформації при напруженні, що дорівнює половині руйнуючого (рис. 4); E_{oed}^{ref} – компресійний модуль деформації; E_{ur}^{ref} – модуль деформації за гілкою вторинного завантаження (прийнято $E_{ur}^{ref} = 3E_{oed}^{ref}$ за даними геодезичних спостережень); m – пока-

зник жорсткості гіперболічної функції (інтенсивність зміцнення ґрунту).

Для умов одометра використано наступне співвідношення між напруженнями та деформаціями моделі:

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \cdot (\sigma / p^{ref})^m \quad (1)$$

де p^{ref} – тиск, 100 кПа; $m = 0,8$ (за геодезичними спостереженнями).

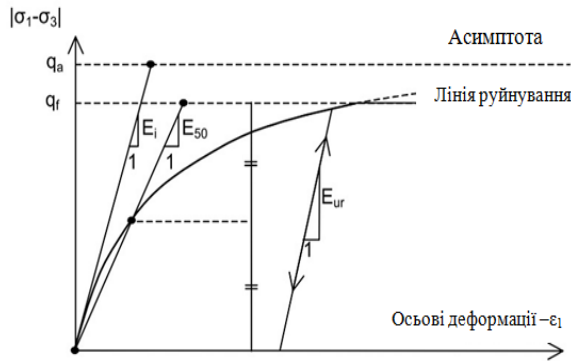


Рис. 4. Загальний вигляд залежності вертикальної деформації ϵ від девіатора напружень $|\sigma_1 - \sigma_3|$ для HSM

На рис. 5 наведена залежність осідання основи силосів від часу (при повному їх завантаженні) за чисельним моделюванням.

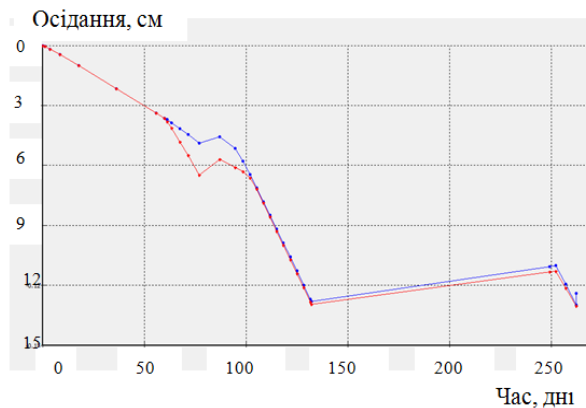


Рис. 5. Графіки розвитку осідань основ двох силосів у часі за моделюванням

Результати імітаційного моделювання

Завершальний етап досліджень – імітаційне чисельне моделювання. Тобто, враховувалася просторова неоднорідність властивостей основи та елементів її армування, випадкова природа циклічного завантаження силосів. Статистичні параметри вхідних ВВ визначались експериментально на базі лабораторних і польових досліджень, а також з аналізу літературних джерел за даним напрямком (табл. 3).

Таблиця 3

Вихідні дані для імовірнісного розрахунку армованої основи фундаменту силосів

Найменування характеристики	Закон розподілу	Статистичні параметри	
		стандарт	коефіцієнт варіації, %
Модуль деформації ґрунту, МПа	Логарифмічно нормальний	*	15
Модуль деформації ґрунтоцементу, МПа	Нормальний	27	15
Завантаження силосу, кПа	Нормальний	**	30

Примітка. * – прийнято за табл. 1; ** – змінний, оскільки циклічне завантаження; приймалося за [1]

Імовірнісний розрахунок ускладнений великою кількістю ВВ – характеристики деформативності всіх шарів основи, модуль деформації ґрунтоцементу, циклічне завантаження кожного силосу. Тому для його спрощення можливо за дослідженнями [3] модуль деформації стиснутої товщі армованої основи приймати як середньо виважений зі статистичними параметрами, що визначалися аналітично на основі формули (2):

$$\bar{E} = (E_s \cdot V_s + E_{sc} \cdot V_{sc}) / V \quad (2)$$

де \bar{E} – середньозважений модуль деформації; E_s, E_{sc} – модулі деформації ґрунту та ґрунтоцементу відповідно; V_s, V_{sc} – об'єми ґрунту та ґрунтоцементу в армованому масиві загальним об'ємом V .

У результаті такого підходу визначено, що розподіл ВВ модуля деформації армованого масиву близький до нормального, коефіцієнт варіації складає 15 %.

Для уникнення великої кількості ітерацій при імітаційному чисельному моделюванні МСЕ використано Point Estimate Method (PEM) [7, 12, 13]. Принцип даного підходу зображено на рис. 6.

У нашому випадку одночасно варіювали фактори: 1) модуль деформації шарів стиснутої товщі армованої основи E ; 2) завантаження силосу № 1; 3) завантаження силосу № 2. При різних комбінаціях ВВ виконувалось чисельне моделювання та визначались осідання основи і крен плити на різних етапах експлуатації силосів (первинне завантаження-розвантаження, наступні серії завантаження-розвантаження).

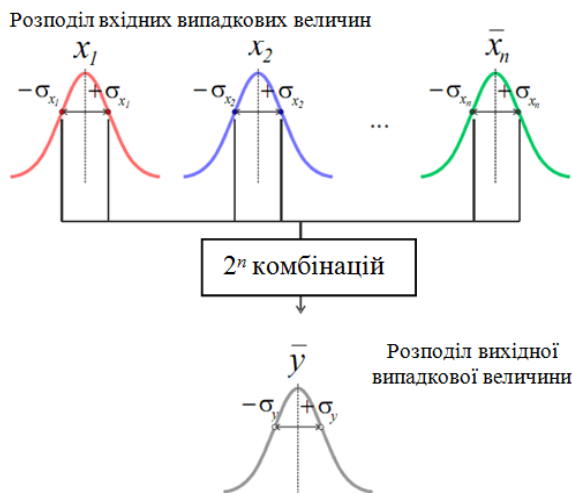


Рис. 6. Ілюстрація принципу імовірнісного розрахунку за методикою REM

На рис. 7 наведено деформовану скінченно-елементну просторову сітку розрахункової моделі на одному з етапів імітаційного моделювання за REM.

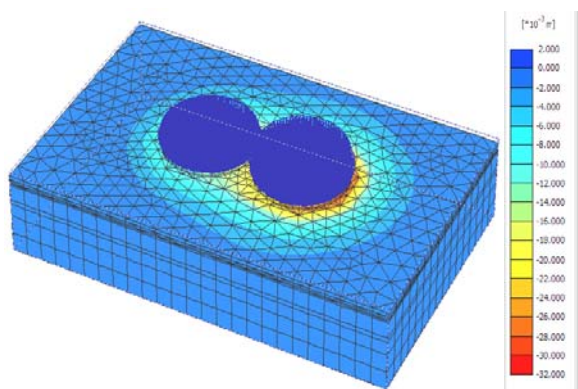


Рис. 7. Деформована скінченно-елементна просторова сітка розрахункової моделі на одному з етапів імітаційного моделювання за REM

З отриманими ВВ осідання основи та крену фундаментної плити виконували статистичну обробку (будували розподіли ВВ і визначали статистичні параметри). Розподіл і статистичні параметри ВВ осідання армованої основи фундаментної плити після первинного завантаження і розвантаження за результатами імітаційного чисельного розрахунку наведено на рис. 8. Розподіл і статистичні параметри ВВ крену фундаментної плити наведено на рис. 9 (значення крену помножені на 10^4).

При наступних завантаженнях силосів абсолютні осідання основи збільшуються, та мають явний затухаючий характер. При цьому імовірність відмови за критерієм осідання не перевищує 0,001, а за критерієм крену – 0,07.

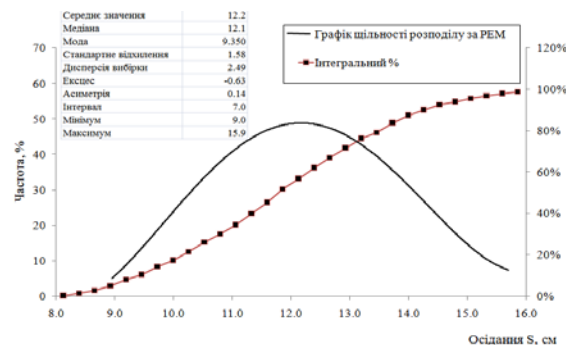


Рис. 8. Розподіл ВВ осідання армованої основи фундаментної плити силосів за результатами імітаційного розрахунку MCE

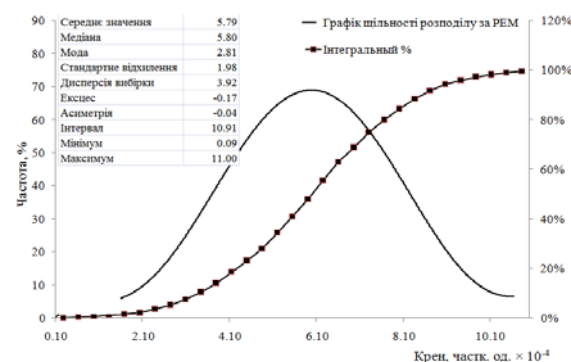


Рис. 9. Розподіл ВВ крену фундаментної плити силосів за результатами імітаційного розрахунку MCE (значення крену помножені на 10^4)

На базі отриманих за імітаційним моделюванням статистичних даних осідання армованої основи та крену фундаментної плити визначено імовірність відмови і безвідмовної роботи конструкції за критеріями абсолютного осідання (рис. 10) та крену залежно від проценту армування слабкої основи ВГЦЕ. За імітаційним моделюванням отримано, що імовірність відмови за критерієм крену у залежності від проценту армування (15...25 %) слабкої основи ВГЦЕ коливалася від 0,03 до 0,05.

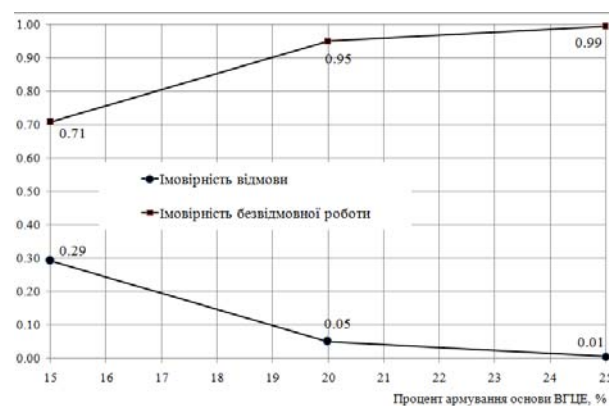


Рис. 10. Імовірність відмови та безвідмовної роботи споруди за критерієм абсолютного осідання залежно від проценту армування основи

З рис. 10 видно, що для забезпечення рівня надійності безвідмовної роботи $p = 0,9$ за критерієм осідання основи та крену фундаментної плити достатній процент армування 19 %.

Висновки досліджень

Отже, для чисельного моделювання НДС осн плитних фундаментів силосів доцільно використовувати в якості моделі ґрунту HSM, оскільки вона коректно описує як етапи завантаження, так і розвантаження. При моделюванні також доречно враховувати швидкість завантаження силосів. При дотриманні даних рекомендацій детерміноване чисельне моделювання первинного завантаження-розвантаження близько співпадає з результатами геодезичних спостережень за осіданнями основи фундаментів силосів.

Для переходу від детермінованих розрахунків до імовірнісних слід мати статистичну базу ВВ властивостей основи та елементів її армування (стохастична основа), а також завантаження силосів. За відсутності цих даних можливо використати досвід авторів статті.

Для імітаційного моделювання НДС армованої основи МСЕ доцільно використовувати РЕМ. В даній роботі при одночасній варіації модуля деформації шарів стиснутої товщі армованої основи і завантаження силосів отримано розподіли та статистичні параметри ВВ осідання й крену. Ці дані визначалися при циклічних завантаженнях силосів.

За результатами імітаційного моделювання допустима нерівномірність завантаження силосів зі спільною фундаментною плитою на армованій основі складає 20 %. При цьому імовірність відмови споруди за критерієм гранично допустимого крену фундаментної плити $i = 0,002$ буде менше 0,01. На базі результатів імітаційного моделювання МСЕ за РЕМ для рівня надійності $p = 0,9$ підібрано мінімально необхідний процент армування основи ВГЦЕ ($i = 19$ %).

Інструмент імовірнісного аналізу в програмних комплексах, що реалізують МСЕ, безумовно є корисними для можливості підвищення надійності рішення геотехнічних задач.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- ДБН В.2.2-8-98. Підприємства, будівлі і споруди по зберігання та переробці зерна [Текст]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 39 с.
- ДБН В.2.1-10-2009. Основи та фундаменти споруд [Текст]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 104 с.
- Зоценко, Н. Л. Закрепление оснований цементацией бурсмесительным методом [Текст] / Н. Л. Зоценко, И. И. Ларцева, В. И. Марченко // Геотехнические проблемы мегаполисов: тр. междунар. конф. по геотехнике, Т. 5. – М.: ПИ «Геореконструкция», 2010. – С. 1781–1788.
- Винников, Ю. Л. Численный расчет армированного основания в вероятностной постановке [Текст] / Ю. Л. Винников, М. А. Харченко, В. И. Марченко // Численные методы расчетов в практической геотехнике: сб. статей науч.-техн. конф. / СПбГАСУ. – С-Пб., 2012. – С. 86–93.
- Винников, Ю. Л. Імовірнісний аналіз напружено-деформованого стану армованої основи методом скінчених елементів [Текст] / Ю. Л. Винников, М. О. Харченко, В. І. Марченко // Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. пр. / НУВГП. – Рівне, 2012. – Вип. 23. – С. 555–562.
- Won, J. A probabilistic approach to estimate one dimensional consolidation settlements [Текст] / J. Won // Proc. of the 17th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Olexandria, 2009. – P. 2012–2015.
- Fenton, G. Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering [Текст] / G. Fenton. – Utah, 1997. – 96 p.
- Wang, Y. Study on autocorrelation model and reduction function of variance of soil random field [Текст] / Y. Wang, B. Wang // Proc. of the 1st Intern. Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR2007). – Shanghai, 2007. – P. 265–272.
- Pereira, C. Shallow Foundation Design through Probabilistic and Deterministic [Текст] / C. Pereira & L. Caldeira // Proc. of the 3rd Intern. Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR2011). – Munich, 2011. – P. 199–207.
- Xue, J. Reliability analysis of shallow foundations subjected to varied inclined loads [Текст] / J. Xue & D. Nag // Proc. of the 3rd Intern. Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR2011). – Munich, 2011. – P. 377–384.
- Kisse, A. A Consistent Failure Model for Probabilistic Analysis of Shallow Foundations [Текст] / A. Kisse // Proc. of the 3rd Intern. Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR2011). – Munich, 2011. – P. 385–392.
- Baars, S. Adaption of finite element models for probabilistic design [Текст] / M. A. Deptula, E. Dembicki, Ph. Gotteland // Proc. of the 11rd Baltic Sea Geotechnical Conf. «Geotechnics in Maritime Engineering». – Gdansk, Poland, 2007. – P. 683–689.
- Haldar, A. Reliability Assessment Using Stochastic Finite Elements Analysis [Текст] / A. Haldar, S. Mahadevan. – New York: John Wiley, 2000. – 220 p.
- Stefanou, G. The stochastic finite element methods: past, present and future [Текст] / G. Stefanou // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – Vol. 198, № 9–12, 2009. – P. 1031–1051.

15. Peschl, G. Reliability analysis in geotechnics with deterministic finite elements – a comparison of two methods [Текст] / G. Pechl, H. Schweiger // Proc. of 5th European Conf. on Numerical Methods in Geotechnical Engineering (NUMGE 2002). – Paris, France, 2002. – P. 229–304.
16. Stein, E. Adaptive finite element analysis and modeling of solids and structures. Findings, problems and trends [Текст] / E. Stein, M. Ruter, S. Ohnimus // Inter. Jurnal for Numerical Methods in Engineerings. – 60 (1), 2004. – P. 103–138.
17. Sudret, B. Stochastic Finite Elements Methods and Reliability. A state-of-the-Art Report [Текст] / B. Sudret, A. Kiureghian. – Berkeley: Civil and Environment Engineering University of California, 2000. – 173 p.
18. Fredlund, M. Finite elements stochastic analysis [Текст] / M. Fredlund // Proc. of 57th Canadian Geotechnical Conf. and 5th Joint IAHR–CGS Conf. – Quebec, Canada, 2004. – P. 201–206.
19. Beacher, G. Reliability and statistics in geotechnical Engineering [Текст] / G. Beacher, J. Cristian. – New York: John Wiley, 2003. – 619 p.
20. Phoon, K. Reliability-based design in geotechnical engineering. Computations and applications [Текст] / K. Phoon. – New York: Taylor & Francis, 2008. – 530 p.
21. Manjuprasad, M. Adaptive Random Field Mesh Refinements in Stochastic Finite Element Reliability Analysis of Structures [Текст] / M. Manjuprasad, C. Manohar // CMES: Tech. Science Press, 2007. – V. 19. – P. 23–54.

Надійшла до редколегії 02.07.2012.
Прийнята до друку 24.07.2012.

Ю. Л. ВИННИКОВ, М. А. ХАРЧЕНКО, В. И. МАРЧЕНКО (Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка)

РАСЧЕТ ФУНДАМЕНТНОЙ ПЛИТЫ СИЛОСОВ НА АРМИРОВАННОМ СТОХАСТИЧЕСКОМ ОСНОВАНИИ

Определена допустимая неравномерность загрузки двух зернохранилищ силосного типа, которые имеют общую фундаментную плиту на слабом основании, при не превышении которой крен сооружения будет в пределах норм. С этой целью проведено численное моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) слабого основания, которое армировано вертикальными грунтоцементными элементами (ВГЦЭ), фундаментной плиты силосов в пространственной постановке методом конечных элементов (МКЭ). При этом использована в качестве модели грунта Hardening Soil Model (HSM) с параметрами, подобранными на базе натурных геодезических наблюдений за осадками армированного основания плиты. Данная модель адекватно описывает НДС основания как на этапах загрузки, так и разгрузки.

Имитационное моделирование НДС армированного ВГЦЭ основания фундаментной плиты определены статистические параметры осадки и крена плиты. На базе этих данных для уровня надежности $p = 0,9$ подобрано минимально необходимый процент армирования основания ВГЦЭ ($i = 19\%$).

Ключевые слова: фундаментная плита, слабое основание, армирование, осадка, крен, имитационное моделирование

Y. L. VYNNYKOV, M. O. KHARCHENKO, V. I. MARCHENKO (Poltava National Technical University named in honor Yuri Kondratyuk)

DESIGN OF FOUNDATION PLATE OF GRAIN SILAGE ON REINFORCED STOCHASTIC SOIL BASE

It is determined the allowable irregularity loading of two grain silage, which have a common foundation plate on the weak soil base, while not exceeding a heeling building will be within the rules. For this purpose the numerical modeling of tensely-deformed state (TDS) of weak soil base, which reinforced by vertical soil-cement elements (VSCE), foundation plate of grain silage by 3D finite element method (FEM) was done. It used as a soil model the Hardening Soil Model (HSM) with parameters, which selected on the field geodetic observations by settlements of reinforced soil base of plate. This model adequately describes the TDS of soil base as on the stages of loading and unloading.

It is found the statistical parameters of settlements and heeling of foundation plate by statistical simulation of TDS of reinforced soil base by VSCE. For reliability level $p = 0,9$ the minimum required percentage of reinforcement soil base by VSCE is chosen ($i = 19\%$) using these data.

Keywords: foundation plate, weak soil base, reinforcement, settlements, heeling, statistical simulation