



Источник фото: pixabay.com
Photo source: pixabay.com

О ВАЖНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОВЕДЕНИЯ АРМОГРУНТОВОГО СООРУЖЕНИЯ

ВАСИН М.В.
Обозреватель

АННОТАЦИЯ

Предлагаем вниманию читателей обзор материалов статьи «Важность результатов геотехнического мониторинга для оценки поведения армогрунтового сооружения: случай из практики» [1], опубликованной в свое время в журнале *Journal of Applied Engineering Sciences* на английском языке. Авторы указанной статьи – Мариан Друска и Йозеф Влчек, работающие на кафедре геотехники факультета гражданского строительства Университета Жилины (г. Жилина, Словакия).

В указанной статье [1] продемонстрирована важная роль геотехнического мониторинга поведения армогрунтовых сооружений при строительстве и эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры в сложных геологических условиях. Такие сооружения, к сожалению, часто проектируются и возводятся на основе недостаточно качественно выполненных инженерно-геотехнических изысканий или просто неверно проектируются в отношении конкретных условий строительной площадки. Это может привести к большим деформациям сооружения, потере его устойчивости, сокращению срока службы, а восстановительные работы при этом бывают сложными и дорогими.

При модернизации железнодорожной линии Братислава – Тренчин (Словакия) часть насыпи была укреплена подпорной стенкой из насыпного грунта, армированного геосинтетическими материалами. Данные измерений при геотехническом мониторинге этого армогрунтового сооружения были сопоставлены в статье [1] с результатами конечноэлементного моделирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

армогрунтовое сооружение; армогрунтовая подпорная стенка; деформации; метод конечных элементов; геотехнический мониторинг.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

О важности результатов геотехнического мониторинга для оценки поведения армогрунтового сооружения // *Геоинфо*. 2023. № 4. С. 58–63
DOI:10.58339/2949-0677-2023-5-1-58-63

ON THE IMPORTANCE OF GEOTECHNICAL MONITORING RESULTS TO ASSESS THE BEHAVIOR OF A REINFORCED SOIL STRUCTURE

MIHAIL V. VASIN
Reviewer

ABSTRACT

We bring to the attention of the readers a review of the materials of the article "Importance of results obtained from geotechnical monitoring for evaluation of reinforced soil structure – case study" [1], published once before in the Journal of Applied Engineering Sciences in English. The authors of that article are Marian Drusa and Josef Vlcek, who work at the Department of Geotechnics, Faculty of Civil Engineering, University of Zilina (Zilina, Slovakia).

The mentioned article [1] demonstrates the important role of geotechnical monitoring of the behavior of reinforced soil structures during the construction and operation of transport infrastructure facilities in difficult geological conditions. Unfortunately, such sort of structures are often designed and built on the basis of poorly performed geotechnical surveys, or they are simply incorrectly designed in relation to the specific conditions of the construction site. This can lead to large deformations of the structure, loss of its stability, its reduced service life. At that, restoration work can be difficult and expensive.

During the modernization of the Bratislava-Trencin railway line (Slovakia), part of the embankment was reinforced with a retaining wall made of filled-up soil reinforced with geosynthetics. The geotechnical monitoring data were compared in the article [1] with the results of finite element modeling of this reinforced soil structure.

KEYWORDS:

reinforced soil structure; reinforced soil retaining wall; deformations; FEM; geotechnical monitoring.

FOR CITATION:

O vazhnosti rezul'tatov geotekhnicheskogo monitoringa dlya otsenki povedeniya armogruntovoogo sooruzheniya [On the importance of geotechnical monitoring results to assess the behavior of a reinforced soil structure] // Geoinfo. 2023. 4: 58–63 DOI:10.58339/2949-0677-2023-5-1-58-63 (in Rus.).

Введение ►

Мариан Друсa и Йозеф Влчек в начале своей статьи [1] указывают, что авторами работ [2, 3] был выполнен мониторинг состояния и поведения армогрунтовой подпорной стенки, построенной в неблагоприятных инженерно-геологических условиях для укрепления насыпи при модернизации железнодорожной линии. Полученные результаты непосредственных измерений были сопоставлены в работе [1] с результатами конечноэлементного моделирования.

Указанную армогрунтовую подпорную стенку запроектировали с усилением насыпного грунта геосинтетическими материалами и с устройством ее лицевой стороны из сборных бетонных элементов. Ввиду неблагоприятных инженерно-геологических условий данное армогрунтовое сооружение опиралось на геоплиту со сборными вертикальными геодренами

в подстилающем грунте для ускорения консолидации насыпного грунта.

Геотехнический мониторинг ►

Целью указанного геотехнического мониторинга была проверка проектных решений о поведении рассматриваемого армогрунтового сооружения, особенно рисков, связанных с его строительством на грунтах с низкой несущей способностью. Измерения горизонтальных смещений грунта основания проводились с помощью вертикального инклинометра, а его вертикальных смещений – с помощью тензометра (по методикам из работ [4, 5], на которые ссылаются авторы статьи [1]). Для измерения смещений армогрунтового сооружения использовались геодезические методы в соответствии с национальным и европейским стандартами измерения деформаций поверхности.

Друсa и Влчек [1] подчеркивают, что деформации армогрунтовых подпорных стенок с жесткой лицевой поверхностью должны соответствовать следующим допускам:

- смещения – в пределах ± 5 мм на 1 м высоты сооружения;
- локальное выгибание или прогибание вертикальной или горизонтальной поверхности – в пределах 20 мм на 4,5 м высоты сооружения;
- горизонтальное смещение верха стенки – в пределах ± 15 мм от контрольной линии;
- неравномерность осадок в продольном направлении – не более 0,5%.

Авторы статьи [1] отмечают, что еще одним важным параметром, который необходимо контролировать при проектировании и строительстве, согласно европейским стандартам является содержание мелких частиц насыпного

грунта размером менее 0,08 мм: их должно быть не более 5% для водонепроницаемого материала и не более 35% для крупнозернистого материала. Содержание частиц размером менее 0,02 мм не должно превышать 10%. Но критерии по гранулометрическому составу насыпного грунта часто не соблюдаются, что при неподходящей дренажной способности щебня в водонепроницаемой зоне на контактах сегментов стен приводит к появлению влаги на поверхностных блоках. Рекомендуемая длина таких контактных зон – от 0,6 до 1 м. Другим предельным условием является максимально возможное содержание мелких фракций грунта для хорошего взаимодействия георешеток с насыпным материалом.

Для измерения местоположений точек армогрунтового сооружения при мониторинге, как указывают Друса и Влчек [1] на основе работ [2, 3], использовался метод триангуляции, а контроль высоты выполнялся с помощью очень точных методов нивелирования. Для определения поведения сооружения использовались шесть профилей измерений. Каждый профиль был снабжен пятью геодезическими марками для измерения смещений точек на поверхности стенки. Каждый из двух профилей, проходящих через самую высокую часть армогрунтового сооружения, был оборудован инклинометрической скважиной у его подножия, предназначенной для инклинометрических измерений как гори-

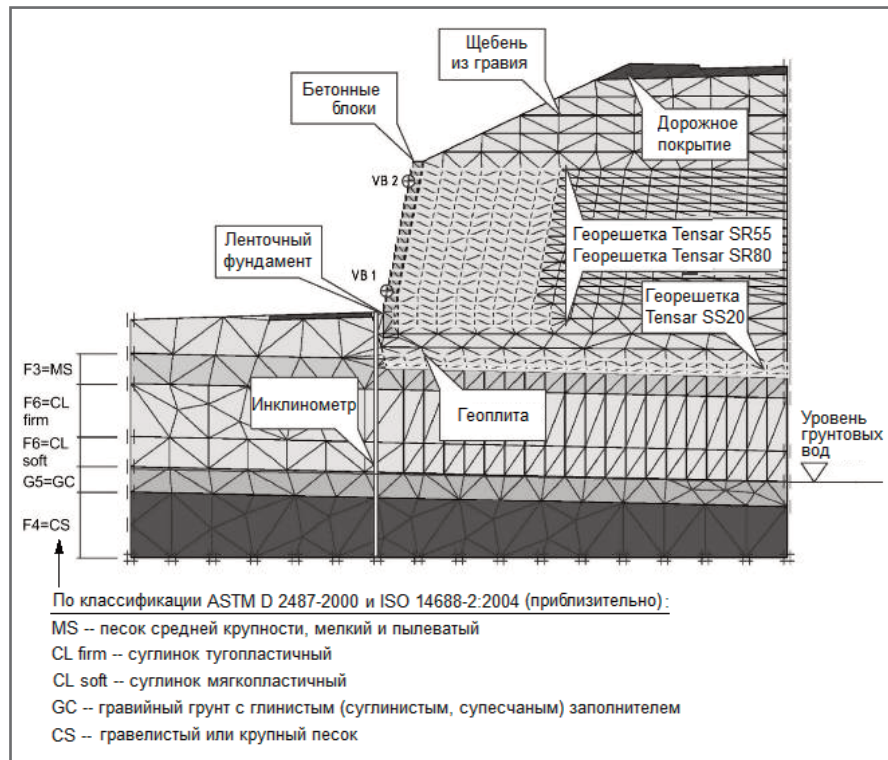


Рис. 1. Модель для 2D конечноэлементного моделирования одного из разрезов армогрунтового сооружения с указанием мест расположения инклинометра и геодезических марок (VB1, VB2) (по [1])

зонтальных, так и вертикальных смещений (по методикам из работы [5–10], на которые ссылаются авторы статьи [1]).

Измерительные приборы были встроены после окончания устройства верхнего уровня армогрунтового сооружения. Это не позволило контролировать его поведение в процессе строитель-

ства, но было полезно для контроля на этапе эксплуатации. Измерения на профилях проводились с месячными интервалами. Всего было выполнено двенадцать измерений, включая основное.

Учитывая то, что мониторинг осуществлялся только после завершения строительства армогрунтового сооруже-

Таблица 1. Параметры грунта основания армогрунтового сооружения (по [1])

Параметр	Обознач.	Грунт (см. рис. 1)				Ед. изм.
		F6=CL firm	F6=CL soft	G5=GC	R6/F4=CS	
Комплексная геомеханическая (конститутивная) модель поведения материала	-	Мора – Кулона				-
Водопроницаемость	-	недренир.	недренир.	дренир.	недренир.	-
Удельный вес выше уровня грунтовых вод	γ	19	19,5	18	19,5	кН/м ³
Удельный вес ниже уровня грунтовых вод	γ_{sat}	20	20,5	19,5	20,5	кН/м ³
Коэффициент фильтрации в горизонтальном направлении	k_x	0,010	0,010	20	0,010	м/сут
Коэффициент фильтрации в вертикальном направлении	k_y	0,001	0,001	2	0,001	м/сут
Модуль Юнга	E_{ref}	4×10^3	4×10^3	50×10^3	4×10^3	кН/м ²
Коэффициент Пуассона	ν	0,35	0,35	0,3	0,35	-
Удельное сцепление	c	15	10	5	15	кН/м ²
Угол внутреннего трения	φ	20	18	30	15	град.
Угол дилатансии	ψ	0	0	0	0	град.
Коэффициент снижения прочности грунта на контакте «конструкция – грунт»	R_{inter}	0,7	0,7	0,9	0,8	-

Таблица 2. Параметры георешеток, усиливающих насыпной грунт (по [1])

Параметр	Обознач.	Георешетка Tensar SS20	Арматура геоплиты	Георешетка Tensar SR55	Георешетка Tensar SR80	Ед. изм.
Модель поведения материала	-	линейно-упругая				-
Осевая жесткость	EA	350	1700	750	1000	кН/м

Таблица 3. Параметры остальных материалов армогрунтового сооружения (по [1])

Параметр	Обознач.	Бетонный фундамент	Бетонные блоки	Гравий 0/63	Дорожное покрытие	Ед. изм.
Модель поведения материала	-	Мора – Кулона				-
Водопроницаемость	-	непористый	непористые	дренир.	непористое	-
Удельный вес выше уровня грунтовых вод	γ	25	24	19,5	23	кН/м ³
Удельный вес ниже уровня грунтовых вод	γ_{sat}	-	-	21	23,5	кН/м ³
Коэффициент фильтрации в горизонтальном направлении	k_x	-	-	100	0,001	м/сут
Коэффициент фильтрации в вертикальном направлении	k_y	-	-	50	0,0001	м/сут
Модуль Юнга	E_{ref}	31×10^6	32×10^6	150×10^3	2×10^6	кН/м ²
Коэффициент Пуассона	ν	0,2	0,2	0,3	0,35	-
Удельное сцепление	c	500	580	0,1	300	кН/м ²
Угол внутреннего трения	φ	35	35	32	30	град.
Угол дилатансии	ψ	-	-	2	0	град.
Коэффициент снижения прочности грунта на контакте «конструкция – грунт»	R_{inter}	-	-	0,9	0,8	-

ния, можно было прогнозировать достаточно малые смещения. Это подтвердилось тем, что измеренные горизонтальные смещения в скважинах были не более 2–3 мм в обоих направлениях, за исключением небольшой глубины под поверхностью у подножия подпорной стенки, где они достигали 7 мм. Последнее было вызвано концентрацией напряжений в зоне нижней стороны подпорной стены. И эти смещения продолжали увеличиваться, но можно было наблюдать некоторое замедление их роста.

Моделирование результатов геотехнического мониторинга ►

Друсса и Влчек [1] задают вопрос: «Почему для успешного проектирования и строительства рассматриваемого сооружения необходимо моделирование?» И сами себе отвечают, что, во-первых, оно нужно для калибровки входных параметров, задействованных при проектировании сооружения, а во-вторых, важно подтвердить способность конечноэлементных моделей быть точными относительно реального поведения сооружений в сложных инженерно-геологических условиях.

Авторы статьи [1] выполнили для рассматриваемого объекта конечноэле-

ментное моделирование в программе PLAXIS 2D, при котором можно было наблюдать за виртуальным процессом строительства армогрунтового сооружения, а также отслеживать его разные параметры в разных точках. Для моделирования Друсса и Влчек [1] выбрали профиль (разрез), где подпорная стенка достигает высоты 6 м (рис. 1).

Геологический разрез и свойства грунтов были определены с помощью инженерно-геологических и геотехнических изысканий и испытаний, проведенных для отдельных слоев армогрунтового сооружения и его грунтового основания. При моделировании Друсса и Влчек [1] использовали 15-узловые конечные элементы и метод расчетов деформаций с учетом упрочнения грунта в процессе его консолидации (consolidation method), что позволяло обновлять сетку конечных элементов и поровые давления, а также реакции грунтов основания на увеличение нагрузки на разных этапах строительства сооружения (эти этапы рассматривались в работе [2], на которую ссылаются авторы статьи [1]).

Обновление сетки включало вторичные эффекты деформирования, учитывающие изменения геометрии при больших деформациях, что положительно

сказывается на устойчивости армогрунтового сооружения. Такая корректировка расчетов имитировала реальное поведение сооружения в процессе строительства.

Обновление поровых давлений учитывало оседание водонасыщенных глинистых слоев, перекрывающих коренную породу, и последующее выталкивающее действие воды, что снижало эффективное напряжение в слоях.

Для детального учета условий при строительстве армогрунтового сооружения и последующей консолидации насыпных грунтов расчеты были разбиты на несколько этапов, соответствующих фактическому ходу работ. Для прямого сравнения результатов моделирования с данными геотехнического мониторинга значения расчетных деформаций были вычтены непосредственно из модели в местах расположения инклинометрической скважины и геодезических марок (по методике из статьи [8], на которую ссылаются авторы работы [1]).

Параметры материалов приведены в таблицах 1–3. Для грунтовых и бетонных конструкций Друсса и Влчек [1] выбрали комплексную геомеханическую модель поведения материалов Мора – Кулона.

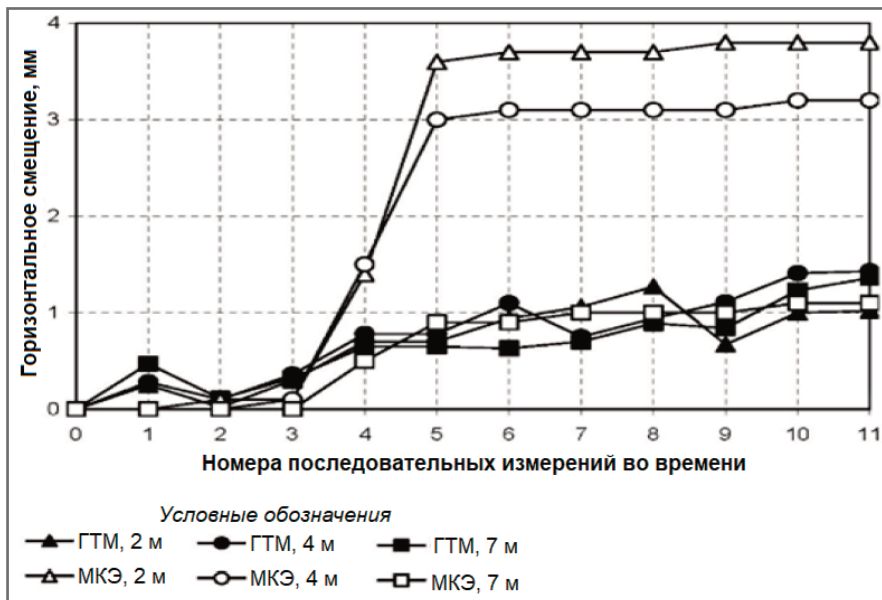


Рис. 2. Развитие во времени горизонтальных смещений на глубине 2, 4 и 7 м ниже поверхности земли по результатам измерений в инклинометрической скважине при геотехническом мониторинге (ГТМ) и по результатам конечноэлементного моделирования (МКЭ). Временной промежуток между измерениями составляет 1 месяц (по [1])

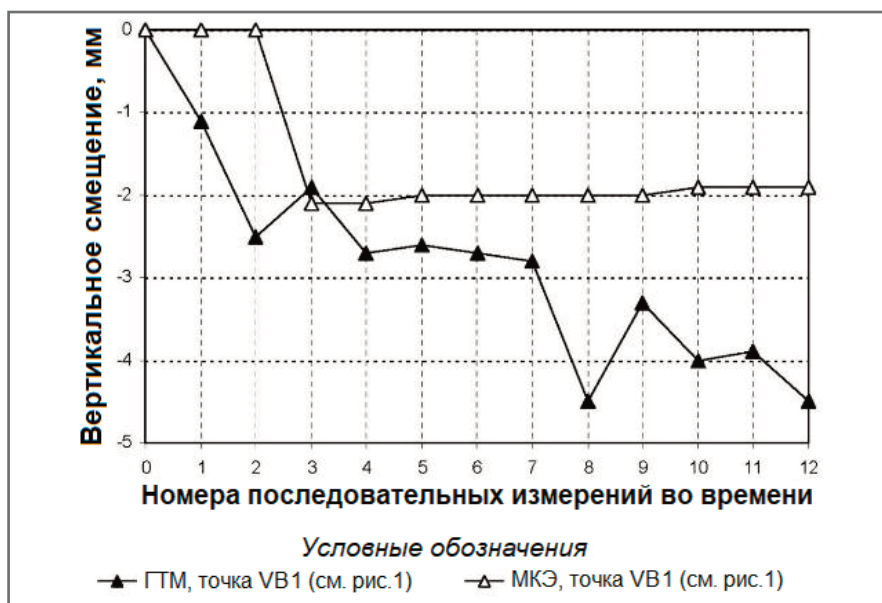


Рис. 3. Развитие во времени вертикальных смещений точки VB1 (см. рис. 1) по результатам измерений по геодезической марке на армогрунтовом сооружении при геотехническом мониторинге (ГТМ) и по данным конечноэлементного моделирования (МКЭ). Временной промежуток между измерениями составляет 1 месяц (по [1])

Модель армирующего материала георешеток авторы работы [1] приняли упругой по отношению к небольшим прогнозируемым деформациям в пределах требований технических стандартов. Значения осевой жесткости ЕА для георешеток были найдены на основе результатов их испытаний при деформации (удлинении), равной 1%. Изменения горизонтальных смещений во времени по результатам измерений в инклинометрической скважине, пробуренной от подножия подпорной стенки,

и по результатам соответствующего конечноэлементного моделирования показаны на рисунке 2.

В целом, как указывают авторы статьи [1], результаты конечноэлементного моделирования отражают тренды геотехнического мониторинга. Но имеются расхождения, которые особенно заметны в слоях пылеватых и глинистых грунтов на глубине 2 и 4 м. Использование для этих грунтов более совершенной комплексной геомеханической (конститутивной) модели поведения ма-

териала позволило бы повысить точность результатов. Однако для такой модели потребовалось бы больше входных данных, которые в рассматриваемом случае из практики не были определены *in situ* или позднее в лаборатории, поэтому были недоступны. С другой стороны, как отмечают Друса и Влчек [1], из рисунка 2 видно, что для моделирования поведения песчаных и гравийных грунтов вполне достаточно модели Мора – Кулона. На глубине 7 м (в слое водонасыщенного гравийного грунта с глинистым заполнителем) результаты мониторинга и моделирования оказались достаточно близкими друг к другу.

Авторы статьи [1] обращают внимание, что на рисунке 2 можно увидеть время укладки слоев дорожной одежды – по увеличению смещений между измерениями 3 и 4 по данным как мониторинга, так и моделирования.

Геодезические работы для рассматриваемого профиля состояли из точных измерений высотных отметок точки VB1 (см. рис. 1) и плановых положений точки VB2 (см. рис. 1), в результате чего были получены соответственно вертикальные и горизонтальные смещения точек (деформации) (рис. 3, 4).

Таким образом, сопоставление результатов мониторинга и моделирования, выполненное авторами работы [1], показало, что метод конечных элементов является подходящим инструментом для анализа поведения армогрунтовых сооружений, в том числе армогрунтовых подпорных стен в транспортной инфраструктуре. Результаты моделирования и мониторинга получились близкими друг к другу, хотя расчеты по данным измерений проводились без достаточной калибровки моделей материалов – только с использованием данных геотехнических изысканий и испытаний *in situ*.

Заключение ►

Конечноэлементный анализ, выполненный авторами статьи [1], показал, что выбранные методы позволяют достаточно точно прогнозировать поведение моделируемых армогрунтовых сооружений. Расхождения между результатами мониторинга и итогами моделирования в рассмотренном случае, как отмечают Друса и Влчек [1], ссылаясь на работу [2], были вызваны несовершенством построения модели. То есть было необходимо такое обобщение и упрощение основных взаимосвязей комплексных геомеханических моделей поведения материалов, устрой-

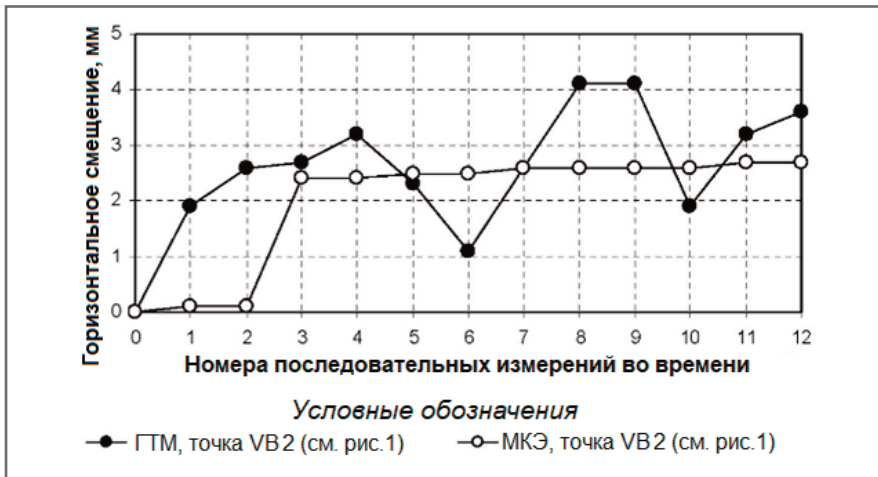


Рис. 4. Развитие во времени горизонтальных смещений точки VB2 (см. рис. 1) по результатам измерений по геодезической марке на армогрунтовом сооружении при геотехническом мониторинге (ГТМ) и по данным конечноэлементного моделирования (МКЭ). Временной промежуток между измерениями составляет 1 месяц (по [1])

ства армогрунтового сооружения и его основания, а также этапов расчетов, чтобы расчетные процедуры могли выполняться без каких-либо неустойчивостей расчетного процесса или необычного поведения модели.

Для более сложных сооружений и основных взаимозависимостей, как подчеркивают авторы работы [1], само по себе моделирование не заменяет в полной мере геотехнический монито-


ринг. В целях создания наиболее подходящих расчетных моделей в таких случаях необходимо анализировать гораздо большее количество данных по объектам мониторинга, что приводит к получению большего количества входной информации для моделирования, с помощью которого можно было бы описать наиболее реалистичное поведение сооружения даже до начала его строительства.

Хотя в ряде случаев и требуются более обширные входные данные, общей тенденцией в области геотехники является реализация проектных решений без какого-либо дополнительного перепроектирования сооружений. Но это возможно, как подчеркивают Друса и Влчек [1], только при тщательном анализе рисков, обусловленных геологической средой, по отношению к свойствам используемых материалов.

На основе результатов выполненного моделирования и работ [2, 6] авторы статьи [1] выделяют следующие моменты.

1. Метод конечных элементов (МКЭ) позволяет с достаточной точностью спрогнозировать поведение армогрунтового сооружения до начала строительных работ.

2. МКЭ позволяет оптимизировать проект сооружения, а также технологию и этапы строительства для соответствия условиям предельных состояний по пригодности к эксплуатации.

3. Моделирование с использованием МКЭ позволяет легко определить требуемые параметры в любой точке модели, а аналитические методы не позволяют или требуют более сложных шагов для получения этих параметров. 

Список литературы (References) ►

1. Drusa M., Vlcek J. Importance of results obtained from geotechnical monitoring for evaluation of reinforced soil structure – case study // *Journal of Applied Engineering Sciences*. 2016. Vol. 6. № 1. Article № 199. P. 23–27. URL: <https://sciendo.com/issue/jaes/6/1>. DOI:10.1515/jaes-2016-0002.
2. Drusa M. Numerical verification of geotechnical structure in unfavourable geological conditions – case study // *Geoscience Engineering*. 2015. Vol. 61. № 2. P. 8–13. ISSN 1802-5420.
3. Decky M., Drusa M., Pepucha L., Zgutova K. *Earth Structures of Transport Constructions*. Harlow, Essex, UK: Pearson Education Limited, 2013. P. 180. ISBN 978-1-78399-925-5.
4. Grof V. Geotechnical monitoring SO 24-38-01 Nove Mesto nad Vahom – Trencianske Bohuslavice. Communication of the overpass in nrkm 104,346 including retaining wall. Zilina: Geoexperts, 2011 (in Slovak).
5. Segalini A., Chiapponi L., Pastarini B. Application of modular underground monitoring system (MUMS) to landslides monitoring: evaluation and new insights // *Engineering Geology for Society and Territory*. Volume 2. Landslide Processes. Springer International Publishing, 2015. DOI:10.1007/978-3-319-09057-3.
6. Das B., Sobhan K. *Principle of Geotechnical Engineering* (8th Edition). Cengage Learning, 2014.
7. Cheben V., Drusa M., Kuba M. Innovative groundwater table monitoring using TDR // *International Journal of GEOMATE*. 2015. Vol. 9. № 1. P. 1428–1433. EID: 2-s2.0-84930257614. ISSN:2186-2982(part). Japan ISBN 10:1-133-11089-4.
8. Lamich D., Marschalko M., Yilmaz I., Bednarova P., Niemiec D., Kubecka K., Mikulenska V. Subsidence measurements in roads and implementation in land use plan optimisation in areas affected by deep coal mining // *Environmental Earth Sciences*. 2016. Vol. 75. № 1. Article № 69. P. 1–11.
9. Yilmaz I., Marschalko M., Lamich D., Drusa M., Machacik J., Heviankova S., Kyncl M., Lackova E., Bestova E., Krcmar D., Stutz E., Bednarik M. Monitoring of heat transmission from buildings into geological environment and evaluation of soil deformation consequences in foundation engineering // *Environmental Earth Sciences*. 2014. Vol. 72. № 8. DOI:10.1007/s12665-014-3200-2.
10. Zguova K., Decky M., Drekova D. Non-destructive determining CBR values of ground structures of engineering constructions // *Proceedings of the 12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2012*. 2012. Vol. 4. P. 107–116.