

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ НАСЫПЕЙ НА ГРУНТАХ НИЗКОЙ ПРОЧНОСТИ

Карасев М.А., Астапенко Т.С.

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург

Ключевые слова: грунты низкой прочности, оценка устойчивости, геомеханические процессы, модели деформирования, геомеханическая безопасность, глинисто-солевые шламы.

Аннотация. В статье отражены результаты экспериментальных исследований по анализу процесса деформирования грунта низкой прочности в процессе отсыпки сыпучего материала при формировании насыпи с целью изучения деформирования грунтов низкой прочности при нагрузке. Значимость данного исследования обусловлена необходимостью разработки методик прогнозирования устойчивости насыпей на грунтах низкой прочности, которые широко используются в инженерной практике. Был проведен стендовый эксперимент для исследования характера развития совместных деформаций сыпучего материала и грунтов низкой прочности в лабораторных условиях путем формирования слабого основания, ограниченного дамбами, и насыпи на нем. Учет развития деформаций осуществлялся при нагружения насыпи грузами различной величины. В ходе проведенного эксперимента был получен график зависимости деформаций поверхности слабого основания от нагрузки насыпи на слабое основание, сложенное глинисто-солевыми шламами. Полученные результаты проведенного исследования выявили закономерности, которые могут быть применены для формирования методики оценки устойчивости насыпей и их численного моделирования.

LABORATORY STUDIES OF DEFORMATION DEVELOPMENT DURING EMBANKMENT FORMATION ON LOW-STRENGTH SOILS

Karasev M.A., Astapenko T.S.

Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg

Keywords: low-strength soils, stability assessment, geomechanical processes, deformation models, geomechanical safety, clay-salt slurries.

Abstract. This paper presents the results of experimental research on the analysis of the deformation process of low-strength soil in the process of dumping granular material during the formation of embankments in order to understand the behaviour of the soil under loading. The significance of this study is due to the need to develop methods for predicting the stability of embankments on low strength soils, which are widely used in engineering practice. A bench experiment was carried out to investigate the nature of joint deformation development of bulk material and low strength soils under laboratory conditions by forming a soft soil bounded by dikes and an embankment on it. The deformation development was taken into account when the embankment was loaded with loads of different magnitudes. In the course of the experiment, a graph of the dependence of deformations of the soft soil surface on the embankment loading on the soft soil composed of clay-salt slurries was obtained. The obtained results of the conducted research revealed regularities that can be applied to the formation of a methodology for assessing the stability of embankments and their numerical modelling.

Введение

Одной из самых сложных задач для геотехнической инженерии является обеспечение устойчивости отвалов и насыпей [1-3], в особенности если они сформированы на грунтах низкой прочности, к которым относятся глины, илы, торфы и другие типы грунтов, которые можно отнести к слабым основаниям. Данные виды грунтов обладают низкой несущей способностью [4], склонностью к интенсивному деформированию [5] и низкими значениями прочности на сдвиг [6]. Ученые отмечают, что грунты с низкой прочностью обладают значительным потенциалом усадки и набухания [7,8] и это представляет основную проблему при строительстве насыпей на данных грунтах. Ввиду этого, оценка устойчивости насыпей является ключевым аспектом в геотехнической инженерии, который представляет собой анализ устойчивости с целью определения возможности возникновения деформационных процессов и разрушения как насыпей, так и ее склонов. При анализе устойчивости насыпей

на грунтах низкой прочности необходимо учитывать как статические, так и динамические воздействия, а также особенности механического поведения грунта на различные нагрузки. Для оценки устойчивости насыпей на грунтах низкой прочности применяются различные аналитические и численные подходы, которые учитывают свойства грунта, условия его нагружения и геометрию насыпи [9]. Среди аналитических методов, применяемых для оценки устойчивости, можно выделить метод предельного равновесия [10-12]. Суть данного метода заключается в том, что система будет устойчива до тех пор, пока общие сдвигающие силы (приложенная нагрузка или вес грунта) уравниваются силами сопротивления грунта (прочность грунта на сдвиг). Если сдвигающие силы превышают силы сопротивления, то происходит разрушение. Оценка устойчивости данным методом осуществляется с помощью расчета коэффициента устойчивости $K_{уст}$, который определяется отношением сил сопротивления к сдвигающим силам. Стоит отметить, что данный метод применим не для всех грунтов, так использование данного метода для грунтов низкой прочности не позволит в полной степени оценить развивающиеся геомеханические процессы и учесть деформационные характеристики, ввиду особых свойств данных грунтов [13]. Среди численных методов оценки устойчивости насыпей можно выделить метод конечных элементов [14-16], метод снижения прочности [17, 18] и метод материальной точки [19, 20].

Ключевым аспектом расчета насыпей и оценке их устойчивости, расположенных на слабых основаниях, является учет поведения грунта низкой прочности на приложенные нагрузки и внедрение сухих пород в процессе формирования насыпи на слабом основании. На данный момент проведено мало исследований, которые могут отразить вопрос учета внедрения сухих пород в слабые грунты при формировании насыпи, в связи с этим данная тема весьма актуальна.

Целью данной работы является исследование характера развития совместных деформаций сыпучего материала и грунтов низкой прочности, которое направлено на изучение процессов, происходящих при взаимодействии этих материалов под нагрузкой, что является необходимым условием для проектирования устойчивых сооружений, возводимых на грунтах низкой прочности, понимания механизмов взаимодействия материалов в сложных условиях нагружения и прогнозирования развития геомеханических процессов.

Методы исследования

Исследование характера развития совместных деформаций сыпучего материала и грунтов низкой прочности в лабораторных условиях проводилось на стендовом оборудовании. В качестве сыпучего материала был использован песок с насыпной плотностью $1,67 \text{ г/см}^3$ и углом естественного откоса при насыпной плотности 35° . В качестве грунта низкой прочности были использованы глинисто-солевые шламы калийного месторождения с плотностью $1,14 \text{ г/см}^3$ и гранулометрическим составом, представленным в таблице 1.

Табл. 1. Гранулометрический состав глинисто-солевых шламов в % по фракциям в мм

Фракция, мм				
0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	0,01-0,002
Содержание частиц, %				
1,1	3,2	52,4	36	3,7

Для проведения эксперимента на стендовом оборудовании было сформировано слабое основание из глинисто-солевых шламов высотой 10 см, огражденное дамбами с двух сторон высотой 15 см. Затем осуществлялось формирование насыпи путем послойной отсыпки песка на высоту 15 см, стенд представлен на рисунке 1.

Стенд был разделен на две части, и проведение эксперимента осуществлялось поочередно в двух частях. После укладки слоя сыпучего материала измерялся параметр внедрения сыпучего материала в слабое основание. После проведенных измерений, формировался следующий слой сыпучего материала. Как только была сформирована насыпь

высотой 15 см, выполнялось ее нагружение грузами до 17,6 кПа. После каждой ступени нагружения фиксировались значения внедрения песка в глинисто-солевые шламы. Схема внедрения сыпучего материала в глинисто-солевые шламы представлена на рисунках 2 и 3.

По полученным значениям был построен график зависимости осадки от нагрузки, который представлен на рисунке 4.

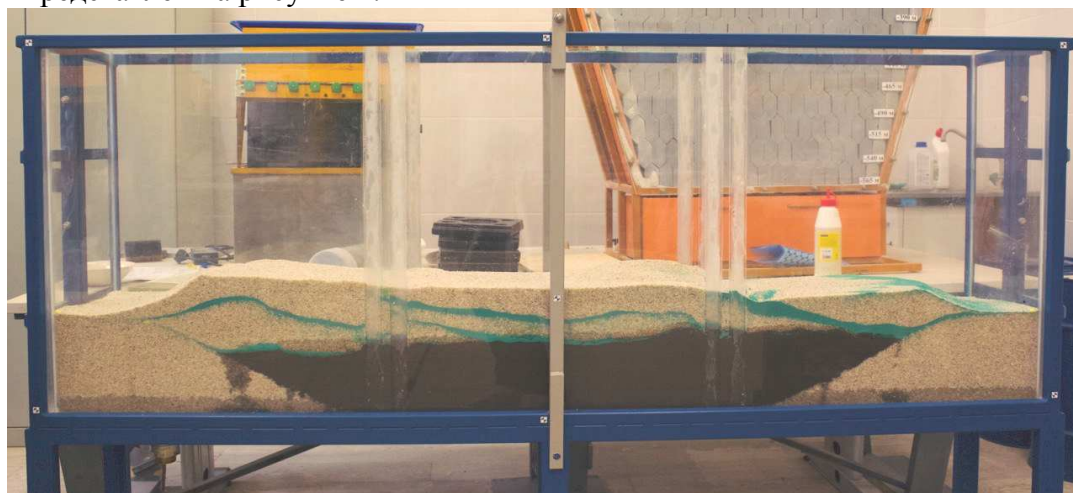


Рис. 1. Эксперимент по исследованию характера развития совместных деформаций сыпучего материала и грунтов низкой прочности

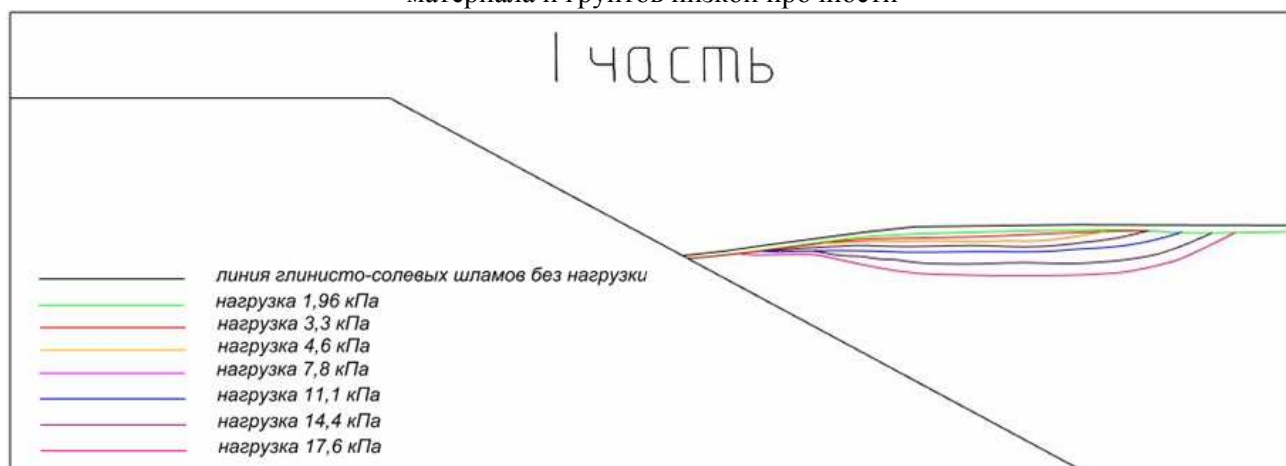


Рис. 2. Схема внедрения сыпучего материала в глинисто-солевые шламы в первой части стенда

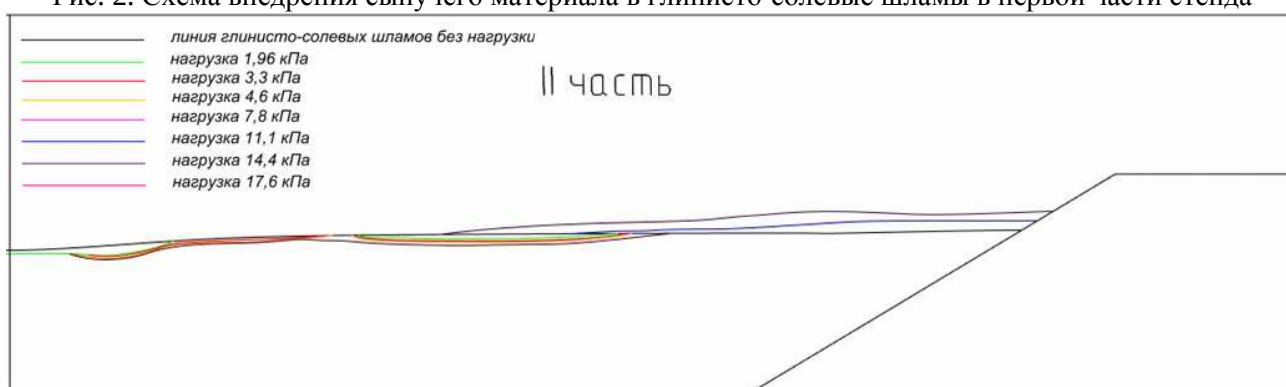


Рис. 3. Схема внедрения сыпучего материала в глинисто-солевые шламы во второй части стенда

Основные результаты и выводы

На полученном графике (рис. 4) представлена зависимость деформации поверхности слабого основания от нагрузки насыпи на слабое основание, сложенное глинисто-солевыми шламами. График отображает зависимость параметров на каждой стадии нагружения, по полученным результатам из графика (рис. 4) и рисунков 2 и 3 можно сделать вывод, что при внедрении сыпучего материала в глинисто-солевые шламы, начиная с нагрузки 3,3 кПа,

развиваются пластические деформации. Нагрузка, оказываемая на слабое основание, варьируется от 0 до 17,6 кПа, а деформация поверхности грунта от 0 до 2,1 см, что отражает поведение грунта при относительно небольших нагрузках при моделировании начальных условий осадки насыпи в реальных условиях. При нагрузке от 11 кПа начинается активная фаза внедрения сыпучего материала в грунт низкой прочности, на данном этапе поры, заполненные рассолом и воздухом, начинают сжиматься интенсивнее, вызывая смещение частиц грунта. В этот момент происходит уплотнение грунта ввиду перераспределения напряжений.

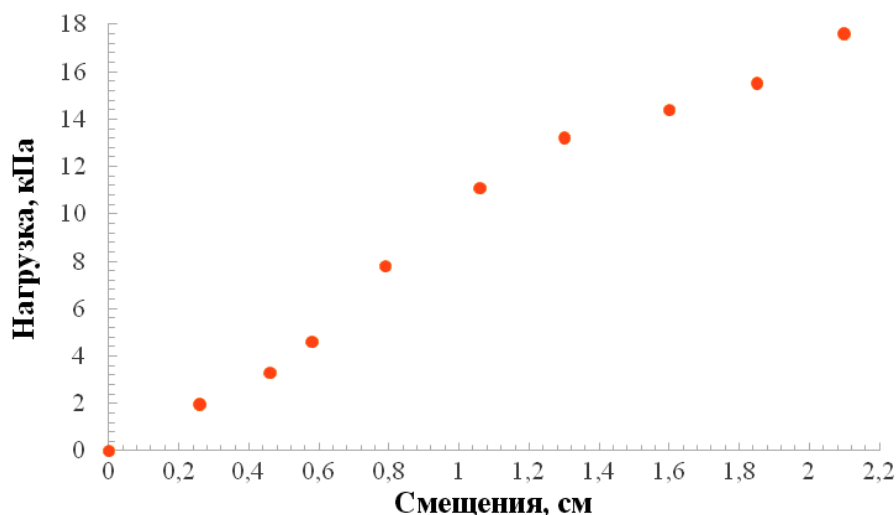


Рис. 4. График зависимости деформации поверхности слабого основания от нагрузки насыпи

По полученным результатам можно сделать вывод, что поведение грунта низкой прочности является пластичным в пределах изучаемого диапазона и полученная деформация слабого основания, пропорциональна оказываемой нагрузке на него. Исходя из анализа полученных данных, авторы считают, что полученные зависимости о поведении грунта низкой прочности при небольших нагрузках могут быть использованы для предварительных инженерных расчетов, а также для разработки методики оценки устойчивости насыпей и их численного моделирования.

Список литературы

1. Кутепов Ю.Ю. Гидрогеомеханическое обоснование устойчивости бортов карьеров при размещении в них жидких промышленных отходов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 9. – С. 65-77. – doi.org/10.25018/0236_1493_2024_9_0_65.
2. Протосеня А.Г., Кутепов Ю.Ю. Прогноз устойчивости гидроотвалов на подрабатываемых подземными горными работами территориях // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 3. – С. 97-112. – doi.org/10.25018/0236-1493-2019-03-0-97-112.
3. Кутепов Ю.И., Кутепова Н.А., Васильева А.Д. Обоснование устойчивости внешних отвалов Кузбасса и мониторинг их состояния // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 4. – С. 109-120. – doi.org/10.25018/0236-1493-2019-04-0-109-120.
4. Ozdemir M.A. Improvement in bearing capacity of a soft soil by addition of fly ash // Procedia Engineering. 2016, vol. 143, pp. 498-505. doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.063.
5. Teunissen H., Zwanenburg C. Modelling strains of soft soils // Procedia Engineering. 2017, vol. 175, pp. 165-174. doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.049.
6. Mirzababaei M., Arulrajah A., Haque A., Nimbalkar S., Mohajerani A. Effect of fiber reinforcement on shear strength and void ratio of soft clay // Geosynthetics International. 2018, vol. 25, no. 4, pp. 471-480. – doi.org/10.1680/jgein.18.00023.
7. Govindasamy P., Taha M. R., Alsharef J., Ramalingam K. Influence of nanolime and curing period on unconfined compressive strength of soil // Applied and Environmental Soil Science. 2017, no. 1, pp. 8307493. doi.org/10.1155/2017/8307493.
8. Nelson J.D., Chao K.C., Overton D.D., Nelson E.J. Foundation engineering for expansive soils. – John Wiley & Sons, 2015. – 384 p. – doi.org/10.1002/9781118996096.
9. Salunkhe D.P., Bartakke R.N., Chvan G., Kothavale P.R., Digvijay P. An overview on methods for slope stability analysis // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). 2017, vol. 6, no. 03, pp. 2278-0181.

10. Neves M., Cavaleiro V. Slope stability assessment and evaluation of remedial measures using limit equilibrium and finite element approaches // *Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice.* – CRC Press, 2018. – P. 1523-1530.
11. Bergado D.T., Lorenzo G.A., Long P.V. Limit equilibrium method back analyses of geotextile-reinforced embankments on soft Bangkok clay—a case study // *Geosynthetics International*. 2002, vol. 9, no. 3, pp. 217-245. doi.org/10.1680/gein.9.0216.
12. Azarafza M., Akgün H., Ghazifard A., Asghari-Kaljahi E., Rahnamarad J., Derakhshani R. Discontinuous rock slope stability analysis by limit equilibrium approaches – a review // *International Journal of Digital Earth*. 2021, vol. 14, no. 12, pp. 1918-1941. – doi.org/10.1080/17538947.2021.1988163.
13. Карасев М. А., Поспехов Г. Б., Астапенко Т. С., Шишкина В. С. Анализ моделей прогноза напряженно-деформированного состояния техногенных грунтов низкой прочности // *Горный информационно-аналитический бюллетень.* – 2023. – № 11. – С. 49–69. doi.org/10.25018/0236_1493_2023_11_0_49.
14. Kim H.J., Won M.S., Jamin J.C. Finite-element analysis on the stability of geotextile tube-reinforced embankments under scouring // *International Journal of Geomechanics*. 2015, vol. 15, no. 2, p. 06014019. doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000420.
15. Zaman M.W., Mita K.S., Al Azad A., Hossain R., Ul. M. A Numerical Study on Slope Stability Analysis by Finite Element Method Using Femtij-2D Application // *International Conference on Disaster Risk Management (ICDRM 2019)*, Dhaka. – 2019. – P. 12-14.
16. Moellmann A., Vermeer P. A., Huber M. A probabilistic finite element analysis of embankment stability under transient seepage conditions // *Georisk*. 2011, vol. 5, no. 2, pp. 110-119. doi.org/10.1080/17499511003630520.
17. Cui B., Zhang L., Wang W., Sun, Y. SPH approach for stability analysis of soil slope with variable permeabilities // *Soils and Foundations*. 2023, vol. 63, no. 4, p. 101338. doi.org/10.1016/j.sandf.2023.101338.
18. Zhang W., Zheng H., Jiang F., Wang Z., Gao Y. Stability analysis of soil slope based on a water-soil-coupled and parallelized Smoothed Particle Hydrodynamics model // *Computers and Geotechnics*. 2019, vol. 108, pp. 212-225. doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.12.025.
19. Ceccato F., Girardi V., Simonini P. Developing and testing multiphase MPM approaches for the stability of dams and river embankments // *Proceedings of XXIV AIMETA Conference 2019* – Springer International Publishing, 2020. – P. 2179-2195.
20. Ghasemi P., Martinelli M., Cuomo S., Calvello M. MPM modelling of static liquefaction in reduced-scale slope // *Numerical Methods in Geotechnical Engineering IX, Volume 2.* – CRC Press, 2018. – P. 1041-1046.

References

1. Kutepov Yu.Yu. Hydro-geomechanical substantiation of pit wall stability for liquid industrial waste disposal // *Mining information and analytical bulletin*. 2024, no. 9, pp. 65-77. doi.org/10.25018/0236_1493_2024_9_0_65.
2. Protosenya A.G., Kutepov Yu.Yu. Forecast of the stability of hydraulic dumps in the areas underlain by underground mining operations // *Mining information and analytical bulletin*. 2019, no. 3, pp. 97-112. doi.org/10.25018/0236-1493-2019-03-0-97-112.
3. Kutepov Yu.I., Kutepova N.A., Vasilieva A.D. Justification of the stability of external dumps of Kuzbass and monitoring of their condition // *Mining information and analytical bulletin*. 2019, no. 4, pp. 109-120. doi.org/10.25018/0236-1493-2019-04-0-109-120.
4. Ozdemir M.A. Improvement in bearing capacity of a soft soil by addition of fly ash // *Procedia Engineering*. 2016, vol. 143, pp. 498-505. doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.063.
5. Teunissen H., Zwanenburg C. Modelling strains of soft soils // *Procedia Engineering*. 2017, vol. 175, pp. 165-174. doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.049.
6. Mirzababaei M., Arulrajah A., Haque A., Nimbalkar S., Mohajerani A. Effect of fiber reinforcement on shear strength and void ratio of soft clay // *Geosynthetics International*. 2018, vol. 25, no. 4, pp. 471-480. – doi.org/10.1680/jgein.18.00023.
7. Govindasamy P., Taha M. R., Alsharaf J., Ramalingam K. Influence of nanolime and curing period on unconfined compressive strength of soil // *Applied and Environmental Soil Science*. 2017, no. 1, pp. 8307493. doi.org/10.1155/2017/8307493.
8. Nelson J.D., Chao K.C., Overton D.D., Nelson E.J. Foundation engineering for expansive soils. – John Wiley & Sons, 2015. – 384 p. – doi.org/10.1002/9781118996096.
9. Salunkhe D.P., Bartakke R.N., Chvan G., Kothavale P.R., Digvijay P. An overview on methods for slope stability analysis // *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2017, vol. 6, no. 03, pp. 2278-0181.
10. Neves M., Cavaleiro V. Slope stability assessment and evaluation of remedial measures using limit equilibrium and finite element approaches // *Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice.* – CRC Press, 2018. – P. 1523-1530.
11. Bergado D.T., Lorenzo G.A., Long P.V. Limit equilibrium method back analyses of geotextile-reinforced embankments on soft Bangkok clay—a case study // *Geosynthetics International*. 2002, vol. 9, no. 3, pp. 217-245. doi.org/10.1680/gein.9.0216.

12. Azarafza M., Akgün H., Ghazifard A., Asghari-Kaljahi E., Rahnamarad J., Derakhshani R. Discontinuous rock slope stability analysis by limit equilibrium approaches – a review // International Journal of Digital Earth. 2021, vol. 14, no. 12, pp. 1918-1941. – doi.org/10.1080/17538947.2021.1988163.
13. Karasev M.A., Posphehov G.B., Astapenko T.S., Shishkina V.S. Stress-strain behavior prediction models for weak manmade soil // Mining information and analytical bulletin. 2023, no. (11), pp. 49-69. doi.org/10.25018/0236_1493_2023_11_0_49.
14. Kim H.J., Won M.S., Jamin J.C. Finite-element analysis on the stability of geotextile tube-reinforced embankments under scouring // International Journal of Geomechanics. 2015, vol. 15, no. 2, p. 06014019. doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000420.
15. Zaman M.W., Mita K.S., Al Azad A., Hossain R., Ul. M. A Numerical Study on Slope Stability Analysis by Finite Element Method Using Fentij-2D Application // International Conference on Disaster Risk Management (ICDRM 2019), Dhaka. – 2019. – P. 12-14.
16. Moellmann A., Vermeer P. A., Huber M. A probabilistic finite element analysis of embankment stability under transient seepage conditions // Georisk. 2011, vol. 5, no. 2, pp. 110-119. doi.org/10.1080/17499511003630520.
17. Cui B., Zhang L., Wang W., Sun, Y. SPH approach for stability analysis of soil slope with variable permeabilities // Soils and Foundations. 2023, vol. 63, no. 4, p. 101338. doi.org/10.1016/j.sandf.2023.101338.
18. Zhang W., Zheng H., Jiang F., Wang Z., Gao Y. Stability analysis of soil slope based on a water-soil-coupled and parallelized Smoothed Particle Hydrodynamics model // Computers and Geotechnics. 2019, vol. 108, pp. 212-225. doi.org/ 10.1016/j.compgeo.2018.12.025.
19. Ceccato F., Girardi V., Simonini P. Developing and testing multiphase MPM approaches for the stability of dams and river embankments // Proceedings of XXIV AIMETA Conference 2019 – Springer International Publishing, 2020. – P. 2179-2195.
20. Ghasemi P., Martinelli M., Cuomo S., Calvello M. MPM modelling of static liquefaction in reduced-scale slope // Numerical Methods in Geotechnical Engineering IX, Volume 2. – CRC Press, 2018. – P. 1041-1046.

Сведения об авторах:

Карасев Максим Анатольевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительства горных предприятий и подземных сооружений	Karasev Maksim Anatolievich – doctor of technical sciences, associate professor, professor of the Department of construction of mining enterprises and underground Structures
Астапенко Татьяна Сергеевна – аспирант astapenko_ts@pers.spmi.ru	Astapenko Tatiana Sergeevna – postgraduate student

Получена 06.12.2024