УДК 624.15

В.И. Клевеко¹, Д.А. Татьянников¹, Е.О. Драчева²¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия²Пермский государственный национальный исследовательский
университет, Пермь, Россия

СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЬНЫХ ШТАМПОВЫХ ИСПЫТАНИЙ И РАСЧЕТОВ ПО МЕТОДУ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Представлен расчет по методу конечных элементов армированного и неармированного песчаного основания при штамповых модельных испытаниях, реализованный в программном комплексе Plaxis 2D. Проведен сравнительный анализ данных расчетов с результатами модельных штамповых испытаний на основе графиков зависимости «осадка – давление». Сделаны выводы о достоверности расчетов в программном комплексе Plaxis 2D для подобных типов исследований армированных оснований.

Ключевые слова: метод конечных элементов, Plaxis 2D, модельные штамповые испытания, осадка, давление.

V.I. Kleveko¹, D.A. Tatiannikov¹, E.O. Dracheva²¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation²Perm State National Research University, Perm, Russian Federation

COMPARISON OF MODEL TESTS AND CALCULATIONS FINITE ELEMENT METHOD

The paper presents a calculation by the method of finite elements reinforced and unreinforced sand at the base of die model tests implemented in the software package Plaxis 2D. A comparative analysis of these calculations with the results of model tests of die on the basis of plots of "sediment-pressure." The conclusions about the reliability of estimates in the software package Plaxis 2D for similar types of research reinforced bases.

Keywords: finite element method, Plaxis 2D, punching model tests, draft, pressure.

В настоящее время в мировой практике строительства прочно закрепился метод конечных элементов (МКЭ) как основной метод, применяющийся для расчета строительных конструкций. Основные идеи МКЭ были заложены еще в 50-е гг. С тех пор метод значительно изменился, получил мощное теоретическое обоснование и развитие. Одно-

временно с самим методом развивались и средства вычислений, а также средства программного обеспечения, без которых невозможна реализация МКЭ.

Метод конечных элементов позволяет учитывать: природное напряженное состояние; сложное напластования грунтов; изменение деформационных и прочностных свойств грунтов в процессе строительства и эксплуатации сооружений; поэтапное приложении внешних нагрузок на исследуемый объект. Кроме того, МКЭ позволяет производить одновременный расчет по двум предельным состояниям с учетом совместной работы системы «основание – фундамент», расчет напряженно-деформированного состояния грунтов с выявлением зон развития пластических деформаций [1].

Так, на основе МКЭ существует несколько специальных программных комплексов, способных решать геотехнические задачи: Plaxis, ANSYS, FLAC, FEMmodels, GeoSoft, midas GTS, Z-soil и др. Наиболее распространенным в мировой практике является программный комплекс Plaxis 2D. Более подробное описание программного комплекса Plaxis 2D приведено в работах [1–5].

Ввиду широкой распространенности ПК Plaxis 2D авторами была поставлена задача оценить достоверность данного программного продукта путем сравнения зависимостей, полученных экспериментальным путем и рассчитанных в ПК Plaxis 2D.

В программе Plaxis 2D были смоделированы пять задач, эквивалентных испытаниям, описанным в [6–8], а именно – модельные штамповые испытания: неармированного песчаного основания, однослойно и двухслойно армированного нетканым геосинтетическим материалом и геокомпозитом (рис. 1–4).

Рис. 1. Установка для проведения модельных штамповых испытаний

Рис. 2. Неармированное песчаное основание в Plaxis 2D

Рис. 3. Однослойно армированное песчаное основание в Plaxis 2D

Рис. 4. Двухслойно армированное песчаное основание в Plaxis 2D

Расчет велся в условиях плоской деформации. Граничные условия в рассматриваемой задаче принимались следующим образом: по контуру верхней границы перемещения не ограничиваются ($U \neq 0$, $V \neq 0$); по вертикальным граням ограничиваются перемещения в направлении X ($U = 0$, $V \neq 0$); по нижней границе перемещения отсутствуют ($U = 0$, $V = 0$). При расчете использовалась модель Мора – Кулона. Данные физико-механических свойств грунта и материалов были взяты из работ [8–11] и приведены в таблице. Расчет велся до разрушения тела грунта. Ступени нагрузки задавались аналогично штамповым испытаниям и составляли 15 кПа.

Значения физико-механических свойств грунтов и материалов
для расчета в ПК Plaxis 2D

Характеристики	Грунт основания	Армирующая прослойка (нетканый геосинтетический материал/геокомпозит)
Удельный вес грунта γ , кН/м ³	15,94	—
Коэффициент Пуассона ν	0,39	—
Модуль сдвига G , кПа	231,65	—
Модуль деформации E , кПа	650	—
Удельное сцепление C , кПа	2,4	—
Угол внутреннего трения ϕ , град	37	—
Жесткость арматуры, кН/м	—	5/235

На рис. 5–9 приведены совмещенные графики зависимости «осадка – давление», на которых представлены результаты модельных штамповых испытаний и результаты расчетов в ПК Plaxis.

Рис. 5. Сравнение результатов модельных штамповых испытаний и расчета в ПК Plaxis для неармированного песчаного основания

Рис. 6. Сравнение результатов модельных штамповых испытаний и расчета в ПК Plaxis для песчаного основания, однослойно армированного геотекстилом

Рис. 7. Сравнение результатов модельных штамповых испытаний и расчета в ПК Plaxis для песчаного основания, двухслойно армированного геотекстилом

Рис. 8. Сравнение результатов модельных штамповых испытаний и расчета в ПК Plaxis для песчаного основания, однослойно армированного нетканым геосинтетическим материалом

Рис. 9. Сравнение результатов модельных штамповых испытаний и расчета в ПК Plaxis для песчаного основания, двухслойно армированного нетканым геосинтетическим материалом

По итогам выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Расчет в ПК Plaxis велся до разрушения тела грунта, что достаточно точно совпало с началом выпора грунта из-под поверхности штампа при модельных штамповых испытаниях.

2. Исходя из анализа графиков на рис. 5–9 видно, что результаты расчета в ПК Plaxis показывают удовлетворительную сходимость с результатами штамповых испытаний. Для неармированного грунта средняя погрешность не превышает 10 %, а для армированного – 30 %. Таким образом, учитывая, что сравнивались результаты для модельных экспериментов, можно отметить, что МКЭ, реализованный в ПК Plaxis,

позволяет достаточно точно вести расчет подобных типов конструкций из армированного грунта.

Библиографический список

1. Клевеко В.И. Оценка напряженно-деформированного состояния армированных оснований в пылевато-глинистых грунтах: дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 2002. – 152 с.

2. Безгодов М.А., Калошина С.В. Выбор модели грунта при численном моделировании влияния разработки глубоких котлованов на существующую застройку // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Урбанистика. – 2012. – № 2. – С. 17–27.

3. Калошина С.В., Салимгариева Н.И. Влияние подтопления на получение дополнительных осадок зданий и сооружений // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2013. – № 1. – С. 104–113.

4. Кузнецова А.С., Офрихтер В.Г., Пономарев А.Б. Исследование прочностных характеристик песка, армированного дискретными волокнами из полипропилена // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2012. – № 1. – С. 44–55.

5. Золотозубов Д.Г., Пономарев А.Б. Расчеты армированных грунтовых оснований при возникновении карстовых провалов // Вестник ВолГАСУ. – 2010. – № 18. – С. 19–22.

6. Планирование эксперимента по исследованию напряженно-деформированного состояния песчаного грунтового основания с помощью штамповых испытаний / Д.А. Татьянников, К.П. Давлятшин, Я.А. Федоровых, А.Б. Пономарев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2011.

7. Татьянников Д.А., Клевеко В.И., Пономарев А.Б. Анализ работы армированного песчаного основания на основе штамповых модельных испытаний // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Урбанистика. – 2012. – № 4. – С. 92–103.

8. Татьянников Д.А., Клевеко В.И., Пономарев А.Б. Исследование характера работы песчаного основания армированного разными гео-

синтетическими материалами на основе штамповых модельных испытаний // Геотехника. Теория и практика. Общероссийская конференция молодых ученых, научных работников и специалистов: межвуз. тем. сб. тр. / СПбГАСУ. – СПб., 2013. – С. 33–42.

9. Мащенко А.В., А.Б. Пономарев. Планирование экспериментов по улучшению пучинистых свойств сезоннопромерзающих грунтов с помощью геосинтетических материалов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2013. – № 2. – С. 24–32.

10. Татьянников Д.А., Клевеко В.И. Исследование характера зависимости «деформация – линейная жесткость» для разных типов геосинтетических материалов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. – 2013. – № 1. – С. 165–172.

11. Пономарев А.Б., Татьянников Д.А., Клевеко В.И. Определение линейной жесткости геосинтетических материалов [Электронный ресурс] // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. – 2013. – Вып. – 2(27). – URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/PonomarevTatyannikovKleveko-2013_2\(27\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/PonomarevTatyannikovKleveko-2013_2(27).pdf).

References

1. Kleveko V.I. Otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya armirovannykh osnovanij v pylevato-glinistykh gruntakh [Evaluation of stress-strain state of reinforced bases in silty clay soils]. Thesis of Doctor's degree dissertation, Perm, 2002, 152 p.

2. Bezgodov M.A., Kaloshina S.V. Vybory modeli grunta pri chislennom modelirovanii vliyaniya razrabotki glubokih kotlovanov na sushhestvuyushchuyu zastrojku [Selecting a soil model with numerical simulation of influence on the development of deep excavations existing building]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Urbanistika*, 2012. no. 2, pp. 17-27.

3. Kaloshina S.V., Salimgarieva N.I. Vliyanie podtopleniya na poluchenie dopolnitel'nykh osadok zdaniy i sooruzhenij [Influence of flooding on the increment settlements of buildings and constructions]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura*, 2013, no. 1, pp. 104-113.

4. Kuznetsova A.S., Ofrikhter V.G., Ponomarev A.B. Issledovanie prochnostnykh kharakteristik peska, armirovannogo diskretnymi voloknami iz polipropilena [Investigation of the strength characteristics of sand reinforced with discrete fibers of polypropylene]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura*, 2012, no. 1, pp. 44-55.

5. Zolotozubov D.G., Ponomarev A.B. Raschety armirovannykh gruntovykh os-novaniy pri vozniknovenii karstovykh provalov [Calculations of the reinforced soil bases at generation of karst downfall]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 2010. no. 18, pp. 19-22.

6. Tatyannikov D.A., Davlyatshin K.P., Fedorovykh Ya.A., Ponomarev A.B. Planirovanie eksperimenta po issledovaniyu napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya peschanogo gruntovogo osnovaniya s pomoshchjyu shtampovykh ispytaniy [Planning an experiment to study the stress-strain state of the sandy soil foundation using tests of die]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura*, 2011, pp. 105-109.

7. Tatyannikov D.A., Kleveko V.I., Ponomarev A.B. Analiz raboty armirovannogo peschanogo osnovaniya na osnove shtampovykh model'nykh ispytaniy [Analysis of reinforced sandy base with punching model tests]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Urbanistika*, 2012, no. 4 (8), pp. 92-102.

8. Tatyannikov D.A., Kleveko V.I., Ponomarev A.B. Issledovanie kharaktera raboty peschanogo osnovaniya armirovannogo raznymi geosinteticheskimi materialami na osnove shtampovykh model'nykh ispytaniy [Study of the nature of the sandy base reinforced by different geosynthetic materials based with punching model tests]. *Mezhvuzovskij tematicheskij sbornik trudov "Geotekhnika. Teoriya i praktika. Obshherossiyskaya konferenciya molodykh uchennykh, nauchnykh rabotnikov i specialistov"*. St.-Petersburg: SPbGASU, 2013, pp. 33-42.

9. Mashhenko A.V., A.B. Ponomarev. Planirovanie eksperimentov po uluchsheniyu puchinistykh svoystv sezonnopromerzayushhih gruntov s pomoshch'yu geosinteticheskikh materialov [Experiments to investigate improving of heaving properties of seasonal freezing soils by geosynthetics]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura*, 2013., no. 2, pp. 24-32.

10. Tatyannikov D.A., Kleveko V.I. Issledovanie kharaktera zavisimosti «deformatsiya – linejnaya zhestkost'» dlya raznykh tipov geosin-

teticheskikh materialov [Study of the nature of dependence „strain – linear stiffness“ for different types geosynthetics]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Okhrana okruzhayushchej sredy, transport, bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*, 2013, no. 1, pp. 165-172.

11. Ponomarev A.B., Tatyannikov D.A., Kleveko V.I. Opredelenie lineijnoj zhestkosti geosinteticheskikh materialov [Definition of linear stiffness of geosynthetic materials]. *Internet-vestnik VolgGASU. Seriya: Politematicheskaya*, 2013. no. 2(27). URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/PonomarevTatyannikovKleveko-2013_2\(27\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/PonomarevTatyannikovKleveko-2013_2(27).pdf).

Об авторах

Клевеко Владимир Иванович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительное производство и геотехника» Пермского национального исследовательского политехнического университета (e-mail: spstf@pstu.ru).

Татьянников Даниил Андреевич (Пермь, Россия) – магистрант кафедры «Строительное производство и геотехника» Пермского национального исследовательского политехнического университета (e-mail: spstf@pstu.ru).

Драчева Екатерина Олеговна (Пермь, Россия) – студентка экономического факультета Пермского государственного национального исследовательского университета (e-mail: katya_dracheva@mail.ru).

About the authors

Kleveko Vladimir Ivanovich (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Building production and geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (e-mail: spstf@pstu.ru).

Tatiannikov Daniil Andreevich (Perm, Russian Federation) – Undergraduate student, Department of Building production and geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (e-mail: spstf@pstu.ru).

Dracheva Ekaterina Olegovna (Perm, Russian Federation) – Student, Economic faculty, Perm State National Research University (e-mail: katya_dracheva@mail.ru).

Получено 09.04.2014