

УДК. 624.131.52

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ОСНОВАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ

*Болдырев Г.Г., Муйземнек А.Ю., Малышев И.М.
Пензенский государственный архитектурно-строительный университет
Пензенский технический университет
Московский государственный строительный университет*

Численное решение задач устойчивости оснований фундаментов, перемещения сваи в грунте или определение деформации свободно стоящих и пригруженных откосов грунта связано с вычислением больших перемещений конструкций фундаментов и деформаций в грунтах. В момент потери устойчивости в основании возникают деформации, величина которых превышает сотни процентов. Если задача решается методом конечных элементов, то элементы среды при нагрузке близкой к предельной испытывают большие деформации, что приводит к искажению сети конечных элементов, которая становится физически нереальной.

С целью преодоления данной проблемы в настоящей работе был использован метод решения уравнений движения в произвольный Лагранжево-Эйлеровой (ALE) формулировке /1,2,3/.

Формулировка ALE основана на выборе отсчетной конфигурации, которая не зависит как от материала, так и от пространства. В ALE анализе сеть конечных элементов ни связана с материалом ни фиксирована в пространстве. Сеть деформируется как в Лагранжевой формулировке, но не зависит от материала тела как в Эйлеровой формулировке, сохраняя при этом свою регулярность.

Особенности процессов деформирования и разрушения грунтов, важность учета влияния на поведение грунтов многочисленных факторов обуславливают необходимость использования многоэтапной процедуры решения различных задач в области геотехники. Такая процедура предполагает наличие следующих этапов: испытания грунта, идентификации параметров определяющего соотношения (модели грунта), решения тестовых задач, проведения и численного моделирования испытаний моделей фундаментов. Содержание и объем каждого этапа определяется целями математического моделирования или расчета. Сама процедура может быть итерационной.

В связи с этим задача решалась в несколько этапов. На первом этапе были выполнены опыты с моделью жесткого штампа на песчаном основании. На втором этапе была выбрана модель грунта и определены ее

параметры путем лабораторных испытаний образцов того же песчаного грунта, который использовался при моделировании песчаного основания. На третьем этапе были выполнены расчеты напряженно-деформированного состояния песчаного основания, нагруженного жестким штампом, с использованием программ ANSYS и LS-DYNA. Решение уравнений движения выполнялось методом Лагранжа и ALE, соответственно в программах ANSYS и LS-DYNA.

1. *Штамповые испытания.* Испытаний проводились с целью определения зависимости «осадка – нагрузка» при нагружении жесткого штампа нагрузкой вплоть до потери устойчивости песчаного основания. Испытания проводились в лотке размером в плане 3000×3000 мм и глубиной 2500 мм.

В качестве штампа использовался металлический лист толщиной 12 мм усиленный швеллерами для обеспечения жесткости, размером в плане 300×400 мм. Нагрузка на штамп прикладывалась различным образом. В первой серии опытов исследовалось поведение песчаного основания при центральном действии нагрузки. Во второй серии опытов вертикальная нагрузка прикладывалась с эксцентриситетом в 5 см, а в третьей серии с эксцентриситетом в 10 см в направлении длинной стороны штампа по его оси симметрии. Нагрузка на штамп прикладывалась ступенями 10 % от расчетной предельной с выдержкой на каждой ступени до стабилизации деформаций. Вертикальное перемещение штампа измерялось в двух точках на противоположных сторонах штампа по длинной оси симметрии. Измерение выполнялось двумя прогибомерами с точностью 0,01 мм. В опытах проводилось также измерение деформации поверхности основания в направлении обеих осей симметрии штампа индикаторами часового типа, с точностью измерения 0,01 мм. Нагрузка создавалась гидравлическим домкратом.

Основание было выполнено из мелкозернистого песка с плотностью 1,6 г/см³. Песок укладывался в лоток слоями по 20 см с уплотнением до отмеченной плотности. Влажность песка – 1,4 %.

На рис. 1 приведены средние значения из пяти результатов испытаний для каждого вида нагружения. Из рис. 1 видно влияние эксцентриситета приложения нагрузки на характер осадки штампа и величину предельной нагрузки. Потеря устойчивости песчаного основания в классическом смысле в виде резкой осадки штампа и выпора грунта наблюдалась только при центральном приложении нагрузки. Введение эксцентриситета приводит к тому, что ярко выраженного предельного состояния достичь при нагружении не удается. Осадка штампа сопровождается его поворотом в направлении эксцентриситета действия нагрузки, диаграмма деформирования не имеет резкого перегиба. Участок линейного деформирования уменьшается с ростом эксцентриситета. Выпор грунта

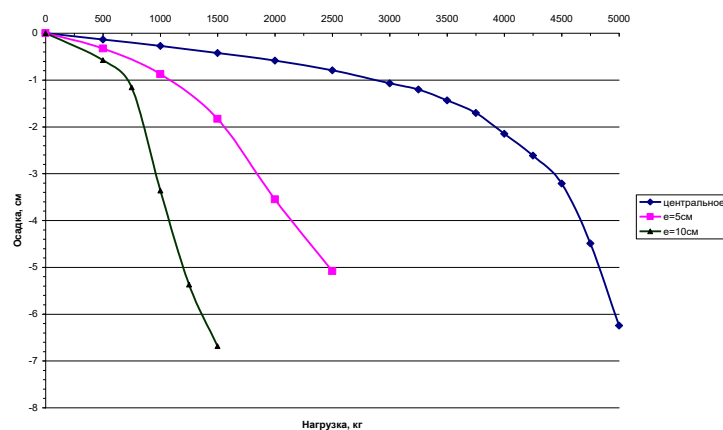


Рис. 1. Зависимость осадки штампа от нагрузки

односторонний. При нагрузке близкой к предельной на поверхности песчаного основания образуются видимые разрывы. Разрывы распространяются в радиальном и кольцевом направлении по отношению к прямоугольному штампу. Размер призмы выпора на поверхности основания уменьшается с ростом эксцентриситета внешней нагрузки. Подобный механизм деформации основания с образованием разрывов был выявлен для условий плоской деформации в работе /4/.

2. *Испытания грунта.* Целью испытаний является получение первичной информации достаточной для идентификации параметров используемой в дальнейших расчетах модели грунта. Испытаниям грунта проводятся после выбора модели для описания напряженно-деформируемого поведения грунта и определения процедуры идентификации ее параметров /5/.

Для описания поведения грунтов в программе ANSYS /6/ имеется две модели материала – модель Друкера-Прагера и усовершенствованная модель Друкера-Прагера. Для описания поведения грунтов в программе LS-DYNA предназначено несколько моделей, среди них CAP-модель и модель Друкера-Прагера.

Для идентификации параметров приведенных выше моделей грунтов достаточно проведения испытаний на трехосное и компрессионное сжатие. Для проведения данных испытаний был использован вычислительный комплекс (АСИС) фирмы «Геотек» /7/ и ГОСТ 12248-96 /8/.

3. *Численное моделирование испытаний песчаного основания жестким штампом.* Целью данного этапа исследований являлась численная

реализация задачи внедрения в песчаный грунт штампа до больших деформаций, возникающих при потере основанием устойчивости. Модель основания представлена массивом песка размером 3х3х2,5 м с физико-механическими характеристиками: $\gamma = 16,0 \text{ кН/м}^3$; $E = 38 \text{ МПа}$; $\nu = 0,25$; $\varphi = 38^\circ$; $c = 2 \text{ кПа}$.

На первом этапе расчеты выполнялись с использованием программы ANSYS, модели грунта Друкера-Прагера и ассоциированного закона течения. Решение уравнений движения выполнено методом Лагранжа. Результаты расчетов приведены на рис. 2 для случая внецентрированной нагрузки. Расчеты были выполнены для трех случаев нагружения, моделируя испытания песка штампом при центральной и внецентрированной нагрузке. Во всех случаях расчетная осадка штампа (рис. 2 б) практически линейно зависит от нагрузки до опытных значений нагрузок, соответствующих потере устойчивости основания. Фактически реализовать предельное состояние в расчетах не удалось, несмотря на то, что в песке основания пластические деформации сдвига (рис. 2 а) имели место и развивались прогрессивно по мере роста внешней нагрузки.

Основываясь на результатах выполненных предварительных численных расчетов, сделан вывод о том, что использование модели грунта Друкера-Прагера в программе ANSYS плохо моделирует результаты опытов. В связи с этим на втором этапе расчетов для описания процесса деформации песчаного основания был применен многокомпонентный подход Лагранжа-Эйлера, реализованный в программе LS-DYNA, в сочетании с CAP-моделью. Некоторые результаты математического моделирования представлены на рис. 3.

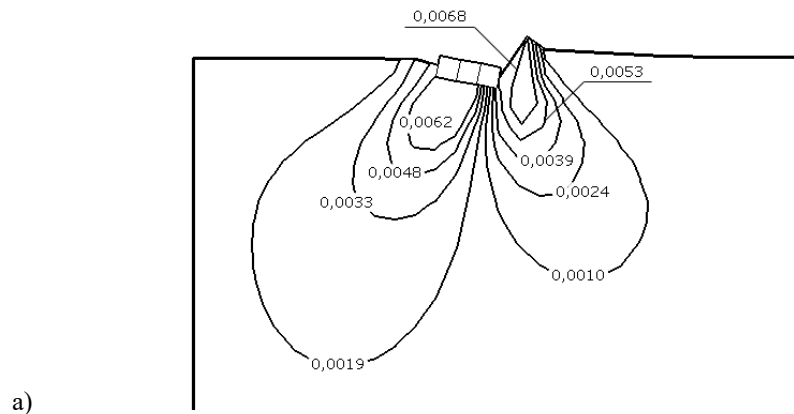


Рис. 2. Результаты решения методом Лагранжа:
а – контуры пластических деформаций; б – зависимость осадки центра штампа от нагрузки;

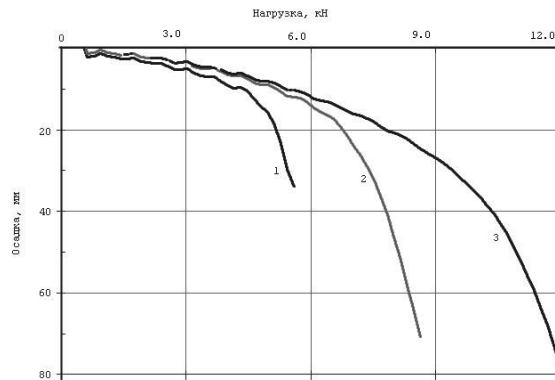


Рис. 3. Результаты решения методом Лагранжа-Эйлера

В отличие от предыдущих расчетов с программой ANSYS, где нагрузка прикладывалась статическим образом, в программе LS-DYNA нагружение выполнялось непрерывно с заданной скоростью перемещения штампа, которая была принята равной 240 см/мин.

Графики зависимости вертикальной силы от вертикального перемещения плиты показаны на рис. 3. Кривая 3 – центральная нагрузка, кривая 2 – эксцентриситет 5 см и кривая 1 – эксцентриситет 10 см. Как видно из рис. 3 графики имеют явно выраженный нелинейный характер, причем решение было устойчивым вплоть до предельной нагрузки на основание.

Литература

1. Di Y., Sato T. Computational Modelling of Large Deformation of Saturated Soils Using an ALE Finite Element Method. *Annals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, No. 47 C, 2004.
2. Di Y., Sato T. Remapping Scheme in ALE Method for Liquefaction Simulation. 16 th ASCE Engineering Mechanics Conference. July 16-18, 2003, University of Washington, Seattle.
3. Nazem M., Sheng D. Arbitrary Lagrangian-Eulerian Method for Consolidation Problems in Geomechanics. VIII International Conference on

Computational Plasticity. COMPLAS VIII. Eds.: E.Onate, D.R.J.Owen, Barcelona, 2005.

4. Ставницер Л.Р., Карпенко В.П. Лабораторное изучение устойчивости песчаного основания при вибрации. «Основания, фундаменты и механика грунтов», 1977, № 2, с. 26 – 28.

5. Болдырев Г.Г., Муйземнек А.Ю., Малышев И.М. Моделирование деформационных процессов в грунтах с использованием программ ANSYS и LS-DYNA. Сб. трудов шестой конференции пользователей программного обеспечения CAD-FEM GMBH 20-21 апреля 2006 г., с. 9 – 20. <http://www.cadfer.ru>.

6. Kohnke P. ANSYS. Theory Reference. – Southpointe, ANSYS, inc. 1998.

7. Комплекс измерительно-вычислительный АСИС. Руководство пользователя. - Пенза, «Геотек», 2002. www.geotek.ru.

8. ГОСТ 12248-96. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. 1997.