УДК 624.159

© Ю. В. Саенко, ассистент
(Северный (Арктический) федеральный университет
им. М. В. Ломоносова)
E-mail: yuri_saenko@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-2-106-111

© Yu. V. Saenko, assistant lecturer
(Northern (Arctic) Federal University
named after M. V. Lomonosov)
E-mail: yuri_saenko@mail.ru

ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЗАБИВНЫХ СВАЙ В ФУНДАМЕНТАХ СУЩЕСТВУЮЩИХ ЗДАНИЙ

EVALUATION OF DRIVEN PILE BEARING CAPACITY IN THE FOUNDATION OF EXISTING BUILDINGS

Рассмотрен алгоритм расчета зависимости осадки фундаментов от нагрузки с помощью ПБК PLAXIS 3D Foundation. Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния основания сравнивались с данными экспериментов различных авторов. Моделирование статических испытаний свай проведено с учетом размеров зон напряженного состояния, изменения в этих зонах деформационных свойств околоствайного грунта и времени работы свай в составе существующего фундамента. Оценка достоверности полученных решений выполнена сопоставлением результатов моделирования с данными натурных экспериментов.

Ключевые слова: численное моделирование, испытания свай статической нагрузкой, несущая способность свай, фундаменты существующих зданий.

The article presents a calculation algorithm of dependency of the foundation settlement on the loading value worked out in the PLAXIS 3D Foundation program system of finite element analysis. The results of modeling of the stress and strain state of the base around the piles have been compared with those of experimental data presented by various researchers. Modeling of pile static load tests has been performed considering the stress area dimensions, soil deformation properties change in the soil around the piles, and the pile operation time as a part of the existing foundation. The reliability evaluation of the obtained solutions has been carried out by comparing the numerical simulation results and the field experiment data.

Keywords: numerical simulation, pile load tests, pile bearing capacity, foundations of existing buildings.

Введение

Работам по надстройке и перепланировке зданий, возведенных на свайных фундаментах, должна предшествовать оценка несущей способности свай, которая, как известно, в глинистых грунтах с течением времени возрастает [1–3]. Из-за отсутствия общепринятых методов расчета ее обычно определяют в существующих зданиях путем статического нагружения.

В статье рассмотрен алгоритм моделирования свай в ПБК PLAXIS 3D Foundation, позволяющий получить графики «нагрузка — осадка», схожие с графиками, полученными в ходе статического нагружения. При моделировании могут быть учтены взаимное расположение свай в фундаменте здания, величины и продолжительность действия нагрузок.

Верификация алгоритма проводилась по данным испытаний забивных свай в зданиях, расположенных в центральной части Архангельска. Нижний конец примерно 25 % свай располагался в моренных суглинках ($I_p = 0,07...0,14$; $I_L = 0,10...0,50$), а оставшихся 75 % свай — в морских суглинках ($I_p = 0,08...0,17$; $I_L = -0,20...0,20$).

1. Алгоритм численного моделирования

Определение несущей способности забивных свай, находившихся под нагрузкой в течение длительного времени, включало последовательное решение трех задач с последующей верификацией решения по экспериментальным данным.

Первая задача состояла в определении эффективных горизонтальных напряжений вдоль боковой поверхности свай и вертикальных напряжений под ее нижним концом после забив-

ки. Задача решалась на трехмерной модели. Слои грунта задавались по данным изысканий. В связи со сложностью назначения параметров упругопластических моделей при многостадийном расчете напряжений в массиве околосвайного грунта было принято решение использовать более простую модель Мора — Кулона (Mohr — Coulomb). Сваи моделировались элементами Plate с линейно-упругой моделью и абсолютно жесткими характеристиками.

Для вычисления напряжений в околосвайном грунте четвертая часть ствола размещалась в углу модели, а горизонтальные напряжения получали путем «раздвижки» плоскостей боковой поверхности на $0,5d$, где d — размер поперечного сечения ствола сваи. Вертикальные напряжения под концом сваи находили за счет перемещения ствола на 1 м вниз. Величина указанных перемещений была подобрана из условия наиболее тесного совпадения результатов моделирования с экспериментальными данными различных авторов [4–6].

Вторая задача заключалась в определении несущей способности одиночной сваи через 25–30 дней после погружения.

Размеры трехмерной модели и свойства сваи были заданы как в предыдущей задаче, но только ее ствол размещался по центру. Коэффициент контакта «плита — грунт» R_{inter} принимался равным 0,67 [7]. Одометрический модуль деформации E_{oed} назначался переменным по мере удаления от сваи исходя из значений напряжений, полученных при решении первой задачи.

Для получения достоверных данных по сжимаемости нами были выполнены компрессионные испытания 109 образцов ледниковых и 76 — морских суглинков из центральной части города при напряжениях до 600 кПа.

Оказалось, что для обеспечения удовлетворительной сходимости результатов численного моделирования с данными полевых опытов достаточно ввести поправочные коэффициенты к модулю деформации m_k для основных несущих слоев грунта во всех рассматриваемых интервалах напряжений (рис. 1). Их значения найдены методом решения обратной задачи. В интервале напряжений 100–200 кПа коэффициент m_k назначался по исследованиям А. И. Агишева [8].

Рис. 1. Зависимости коэффициента m_k от напряжения p для суглинков с различными коэффициентами пористости e

Третья задача заключалась в моделировании статических испытаний свай в составе существующего фундамента [9]. Размеры зон напряженного состояния в околосвайном грунте задавались от эффективных напряжений, вызванных забивкой рассматриваемой и смежных свай и нагрузкой от здания.

Заметим, что численными экспериментами было установлено, что в случае, когда расстояние между осями смежных свай превышает $(4...4,2)d$, эффективные напряжения в околосвайном грунте от забивки сваи не оказывают влияния на несущую способность свай и они работают как одиночные. Эффективные напряжения, создаваемые нагрузкой от здания, были получены на основе консолидационного расчета в ПК PLAXIS 3D.

2. Верификация алгоритма

Первая задача. Решение не представляет трудностей, поэтому ограничимся лишь примером расчетной схемы для моделирования статических испытаний свай и рисунками с зонами напряженного состояния околосвайного грунта (рис. 2).

Вторая задача. Верификация решений второй задачи выполнялась сопоставлением результатов моделирования с данными испытаний 16 одиночных забивных свай статической нагрузкой. Испытания проводились до начала строительства.

В качестве примера на рис. 3 представлены два из 16 расчетных и экспериментальных графиков «нагрузка — осадка».

Перемещение свай при испытаниях доводилось до 24 мм, что составляло 20 % от предельно допустимой осадки. На рис. 4 сравниваются

Рис. 2. Определение зон деформирования околосвайного грунта:
 а — общий вид модели; б — совмещенная эпюра горизонтальных напряжений от «раздвижки» плоскостей боковой поверхности и вертикальных напряжений от погружения сваи на 1 м;
 в — идеализированная модель с зонами уплотнения грунта

значения несущей способности свай, полученные расчетным методом (N_2) и численным моделированием (N_3), с данными, полученными по испытаниям статической вдавливающей нагрузкой (N_1).

Из рис. 4 видно, что предложенный алгоритм численного моделирования с использованием модели грунта Мора — Кулона в ПК PLAXIS 3D Foundation позволяет получить значение несущей способности свай, близкое к данным натурных испытаний одиночных свай статической нагрузкой.

Третья задача. Верификация третьей задачи была основана на анализе несущей способности 16 свай длиной 6...12 м, сечением 30×30 или 35×35 см. Исследуемые сваи находились в составе действующих фундаментов зданий в течение

2...39 лет. Испытания выполнялись путем статического нагружения, для чего верхнюю часть свай срезали и между ними и ростверком устанавливали гидравлический домкрат.

В ряде случаев в загруженных сваях величина напряжений в грунте превышала 600 кПа. В этом случае для нахождения одометрического модуля деформации был использован энергетический метод Беккера [10]. На шести контрольных образцах ледниковых и шести морских суглинков в работе [11] установлено, что график зависимости энергии, затраченной на деформирование от давления свыше 400 кПа, имеет действительно линейный характер, поэтому для напряжений более 600 кПа одометрический модуль деформации находился путем экстраполяции по аппрок-

Рис. 3. Кривые «нагрузка — осадка»:
 — — — испытания свай статической нагрузкой; — — — численное моделирование;
 а — свая длиной 15 м, под концом сваи ледниковый суглинок с $I_L = 0,30$;
 б — свая длиной 16 м, под концом сваи морской суглинок с $I_L = 0,20$

Рис. 4. Значения несущей способности свай:
а — расчетный метод; б — численное моделирование

симирующей прямой, проходящей через точки с давлением 500 и 600 кПа.

Поправочные коэффициенты m_k для давлений свыше 600 кПа назначались по экстраполяции логарифмической кривой (рис. 5).

Как и в первой задаче, потребовалась корректировка модели. Для обеспечения сходимости результатов численного моделирования с данными полевых опытов и учета фактора времени методом решения обратной задачи потребовалось откорректировать коэффициенты контакта ствола сваи с грунтом $R_{inter} = f(t)$. Параметр R_{inter} используется следующим способом:

$$c_i = R_{inter} c; \quad (1)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_i = R_{inter} \operatorname{tg} \varphi, \quad (2)$$

где c — удельное сцепление грунта, кПа; φ — угол внутреннего трения.

Полученная зависимость $R_{inter} = f(t)$ представлена на рис. 6. Как сказано выше, для вновь построенных зданий задавался $R_{inter} = 2/3$.

Рис. 5. Зависимость коэффициентов m_k , используемых для перехода от компрессионных модулей деформации к штамповым, от давления p для суглинков с разными коэффициентами пористости e

На рис. 7 представлены примеры рассчитанных и экспериментальных графиков «нагрузка — осадка». Значения несущей способности свай в эксплуатируемых зданиях приведены на рис. 8.

На рис. 8 видно, что разброс значений несущей способности свай, определенных с помощью предлагаемого численного алгоритма в ПК PLAXIS 3D Foundation (N_4), и результатов полевых испытаний N_1 составил всего лишь от -12 до $+8\%$.

Выводы

Разработан алгоритм численного моделирования напряженно-деформированного состояния вмещающего сваю массива грунта, позволяющий получить зависимости «нагрузка — осадка», схожие с результатами натурных экспериментов по статическим испытаниям свай через 25–30 дней после погружения. Погрешность прогноза несущей способности свай не превышает 15% .

Разработан алгоритм численного моделирования статических испытаний свай в фундаментах существующих зданий, в котором кроме

Рис. 6. Значения коэффициента R_{inter}

Рис. 7. Кривые «нагрузка — осадка»: ————— испытания свай статической нагрузкой; ————— численное моделирование испытаний через 25–30 дней после забивки; ————— численное моделирование испытаний в фундаментах существующих зданий; а — свая 0,35×0,35 м длиной 9 м, под пятой — ледниковый суглинок с $I_L = 0,14$, время эксплуатации 31 год; б — свая 0,35×0,35 м длиной 12 м, под пятой — морской суглинок с $I_L = -0,28$, время эксплуатации 37 лет

Рис. 8. Значения несущей способности на сваю по данным численного моделирования

свойств грунтов основания, размеров свай и расстояния между ними учитываются нагрузки на сваи и продолжительность их действия. Верификация результатов моделирования производилась путем их сопоставления с данными натурных экспериментов. Погрешность прогноза несущей способности свай находится в интервале от -12 до +8 %.

Внедрение в практику предложенного алгоритма расчета позволит получить для забивных свай зависимости «нагрузка — осадка», близкие к данным полевых исследований, повысить надежность реконструируемых сооружений и дать существенный экономический эффект.

Библиографический список

1. Осокин А. И. Передача на сваи дополнительной нагрузки в условиях реконструкции: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 1995. 19 с.

2. Karlsrud K., Mahan A. Evidence of long term ageing effects on axial capacity of piles in soft clay // Proc. of the Art of Foundation Engineering Practice Congress. West Palm Beach, Florida, 2010. Pp. 325–342.

3. Time effects on pile capacity: summary and evaluation of test results / Norwegian Geotechnical Institute. Report 20061251-00-279, Rev. 1. March 2014.

4. Berg V. D. Analysis of soil penetration. Delft University Press, 1994. 175 p.

5. Бартоломей А. А., Омельчак И. М., Юшков Б. С. Прогноз осадок свайных фундаментов. М.: Стройиздат, 1994. 384 с.

6. Юшубе С. В., Рязанов Н. С. Результаты полевых исследований напряженного состояния грунта вокруг забивных коротких свай // Исследования по строительным конструкциям и фундаментам: сб. науч. тр. Томск, 1980. С. 118–122.

7. Swolfs W. M., Engin E. Plaxis 3D 2010: user's manual. Nederland: Plaxis bv, 2010. 1022 p.

8. Агашев А. И. Зависимость между пористостью и модулем деформации, установленная полевыми испытаниями глинистых грунтов // Основания и фундаменты. 1957. № 20. С. 3–6.

9. Саенко Ю. В., Невзоров А. Л. Оценка несущей способности забивных свай в фундаментах существующих зданий // Геотехника. 2016. № 4. С. 50–57.

10. Paniagua P., L'Heureux J.-S., Yang S. Y., Lunne T. L. Study on the practices for preconsolidation stress evaluation from oedometer tests // Proceedings of the 17th Nordic Geotechnical Meeting Challenges in Nordic Geotechnic. Reykjavik, 2016. P. 547–555.

11. Саенко Ю. В., Невзоров А. Л. Деформационно-прочностные характеристики грунтов основания свайных фундаментов // Горный журнал. 2015. № 5. С. 17–21.

References

1. Osokin A. I. *Peredacha na svai dopolnitel'noy nagruzki v usloviyakh rekonstruktsii. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk* [Transfer of additional loading on the piles in conditions of reconstruction. Author's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 1995, 19 p.
2. Karlsrud K., Mahan A. *Evidence of long term ageing effects on axial capacity of piles in soft clay*. Proc. of the Art of Foundation Engineering Practice Congress. West Palm Beach Publ., Florida, 2010, pp. 325–342.
3. *Time effects on pile capacity: summary and evaluation of test results*. Norwegian Geotechnical Institute Publ. Report 20061251-00-279, Rev.1. March 2014.
4. Berg V. D. *Analysis of soil penetration*. Delft University Press Publ., 1994, 175 p.
5. Bartolomey A. A., Omel'chak I. M., Yushkov B. S. *Prognoz osadok svaynykh fundamentov* [Forecast of settlements in pile foundations]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1994, 384 p.
6. Yushchube S. V., Ryazanov N. S. *Rezultaty polevykh issledovaniy napryazhennogo sostoyaniya grunta vokrug zabivnykh korotkikh svay* [Results of the field study of stress state of soil around driven piles]. *Sb. nauch. tr. «Issledovaniya po stroitel'nykh konstruktsiyam i fundamentam»* [Coll. of sci. works «Investigations on building structures and foundations»]. Tomsk, 1980, pp. 118–122.
7. Swolfs W. M., Engin E. *Plaxis 3D 2010. User's manual*. Nederland, Plaxis BV Publ., 2010, 1022 p.
8. Agishev A. I. *Zavisimost' mezhdue poristost'yu i modulem deformatsii, ustanovlennaya polevymi ispytaniyami glinistykh gruntov* [The dependence between porosity and the module of deformation established by field tests of clay soils]. *Osnovaniya i fundamente – Bases and Foundations*, 1957, no. 20, pp. 3–6.
9. Saenko Yu. V., Nevzorov A. L. *Otsenka nesushchey sposobnosti zabivnykh svay v fundamentakh sushchestvuyushchikh zdaniy* [Assessment of the driven piles' bearing capacity in the bases of existing buildings]. *Geotekhnika – Geotechnics*, 2016, no. 4, pp. 50–57.
10. Paniagua P., L'Heureux J.-S., Yang S. Y., Lunne T. L. *Study on the practices for pre-consolidation stress evaluation from oedometer tests*. Proc. of the XVII Nordic Geotechnical Meeting “Challenges in Nordic Geotechnics”. Reykjavik, 2016, pp. 547–555.
11. Saenko Yu. V., Nevzorov A. L. *Deformatsionno-prochnostnye kharakteristiki gruntov osnovaniya svaynykh fundamentov* [Deformation and strength characteristics of soil around the driven pile foundation bases]. *Gornyy zhurnal – Ore and Metals Journal*, 2015, no. 5, pp. 17–21.