

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СВАИ НА ГОРИЗОНТАЛЬНУЮ НАГРУЗКУ

Якушев Д.И., доцент,
Дмитриев С.В., к.т.н., доцент,
Одесская государственная академия строительства и архитектуры
diyakushev@ogasa.org.ua
tele@ukr.net

Аннотация. Корректный учет аварийных (сейсмических) воздействий требует соответствующего моделирования работы свай фундаментов на восприятие значительных горизонтальных сил. Рассмотрены вопросы численного моделирования работы свай на восприятие горизонтальной нагрузки в программных комплексах, реализующих метод конечных элементов, по упрощенным расчетным схемам в линейной и нелинейной постановке. Проанализированы причины несоответствия теоретических выводов с результатами натурных исследований. Выполнено сравнение результатов расчетов по различным методикам с результатами натурных испытаний за поведением свай под горизонтальной нагрузкой. Предложен метод расчета, который показал наименьшее расхождение с натурными наблюдениями.

Ключевые слова: свая, метод конечных элементов, модуль упругости, модуль деформации.

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ПАЛІ НА ГОРИЗОНТАЛЬНЕ НАВАНТАЖЕННЯ

Якушев Д.І., доцент,
Дмитрієв С.В., к.т.н., доцент,
Одеська державна академія будівництва та архітектури
diyakushev@ogasa.org.ua
tele@ukr.net

Анотація. Коректний облік аварійних (сейсмічних) впливів вимагає відповідного моделювання роботи палі фундаментів на сприйняття значних горизонтальних зусиль. Розглянуті питання чисельного моделювання роботи палі на сприйняття горизонтального навантаження в програмних комплексах, що реалізують метод кінцевих елементів, за спрощеними розрахунковими схемами в лінійній і нелінійній постановці. Проаналізовано причини невідповідності теоретичних висновків з результатами натурних досліджень. Виконано порівняння результатів розрахунків за різними методиками з результатами натурних випробувань за поведінкою палі під горизонтальним навантаженням. За результатами порівняння запропонований метод розрахунку, який показав найменшу розбіжність з натурними спостереженнями.

Ключові слова: паля, метод кінцевих елементів, модуль пружності, модуль деформації.

PILES SIMULATION ON THE HORIZONTAL LOAD IN COMPUTER SYSTEMS

Yakushev D.I., Assistant Professor,
Dmitriiev S.V., PhD., Assistant Professor,
Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture
diyakushev@ogasa.org.ua
tele@ukr.net

Abstract. Correct calculation of emergency (seismic) impacts requires appropriate modeling of the pile foundation work on the perception of significant horizontal forces. In this connection, in the article the questions of numerical modeling of the work of piles on the perception of horizontal loading in software complexes implementing the finite element method are considered in simplified design schemes in linear and nonlinear formulations. The reasons for the discrepancy between the theoretical conclusions and the results of field studies are analyzed. Comparison of the results of calculations by different methods with the results of full-scale tests for the behavior of the pile under a horizontal load is performed. The upper end of the pile in the horizontal plane was subjected to grading. The comparison was carried out using the SCAD OFFICE software. Based on the results of the comparison, a calculation method was proposed that showed the smallest discrepancy with full-scale observations of the movements of the upper end of the tested pile.

Keywords: pile, finite element method, elastic modulus, deformation modulus.

Введение. Моделирование совместной работы систем «основание – сооружение» с применением современных программных комплексов позволяет оценивать напряженно-деформированное состояние (НДС) для всего цикла функционирования сооружения: от этапов его возведения – до стадии завершения эксплуатации. С широким внедрением в практику расчетов при проектировании таких программных комплексов, как Lira, Scad, Stark, Robot, Microfe и пр., повышается качество расчетного обоснования, совершенствуются методики выполнения расчетов. Так, расчетное обоснование конструкций с плитным фундаментом, можно выполнять, например, как путем непосредственного моделирования грунтового основания в расчетной схеме включающей сооружение (путем введения в схему объемных или плоских конечных элементов с соответствующими параметрами модуля упругости материала), так и задаваясь коэффициентами постели под элементами пластин (балок – для плоских расчетных схем), вычисленных для заданного грунтового основания. Для уточнения перераспределения напряжений под подошвой фундаментной плиты за счет учета влияния жесткости конструкций сооружения при моделировании основания коэффициентами постели в составе программного комплекса «SCAD Office» реализован итерационный алгоритм определения НДС [1]. Следует отметить, что реализация расчетов с использованием программных комплексов, реализующих метод конечных элементов (МКЭ), носит физически линейный характер (учет нелинейной модели материала, реализованной в некоторых программных комплексах, не позволяет учесть остаточные деформации и не позволяет реализовать принцип суперпозиции при определении расчетных сочетаний усилий и напряжений).

Анализ последних исследований. По-прежнему важным, на сегодняшний день, стоит вопрос о верификации расчетных моделей. Широко обсуждавшийся принцип верификации расчетных моделей путем сопоставления результатов расчетов с применением различных программных комплексов не дал однозначного результата. Проектировщики, как и раньше, вынуждены пользоваться методом «экспертных оценок», а проще говоря, оценка качества расчетного обоснования производится путем ответа на вопрос: «А соответствуют ли

полученные расчетом цифры ожидаемому результату?». Можно привести массу примеров, когда результаты расчета, не «вписывающиеся» в традиционные представления проектировщиков, были отклонены, а расчетные схемы подвергались многократной корректировке. В одних случаях этот процесс позволял выявить ошибки моделирования, в других – приводил к искажению расчетных моделей, что существенно влияло на качество расчетного обоснования.

Цели и задачи. В связи с этим, задачи настоящего исследования сформулированы следующим образом: выполнить сопоставление расчетов сваи на горизонтальную нагрузку по нескольким схемам, применяемым в практике расчетного обоснования свайных фундаментов с результатами натурных наблюдений.

Объекты и методы исследования. Объектом исследования является свая, на которую производится воздействие в горизонтальной плоскости. Методы исследования – теоретические расчеты, выполненные с помощью программного комплекса SCAD, реализующего метод конечных элементов.

Результаты исследований. Широкое и традиционное применение свайных фундаментов различных конструкций в практике промышленного и гражданского строительства, наличие материала наблюдений за их поведением, нашли отражение в технических нормативных документах, регламентирующих их расчет и конструирование. По результатам моделирования работы свайного фундамента в среде ПО, реализующего МКЭ, легко выполнить несложные поверочные расчеты по методикам [2], для одиночных (или кустов) свай, с целью сравнения полученных, к примеру, их осадок. Результаты регламентированного в обязательных к применению технических строительных нормативах, действующих на Украине, испытания свай, дают еще один критерий для оценки адекватности расчетной модели натурным условиям. Даже условно линеаризованные упрощенные модели «основание – здание», включающие фундаменты свайного типа, могут быть приняты для расчетного обоснования при условии их корректировки по результатам натурных испытаний свай. Так, замена грунтового основания упруго-податливыми опорами конечной жесткости часто используется в расчетном обосновании объектов строительства при научном сопровождении, осуществляемом базовой организацией – Государственным научно-исследовательским институтом строительных конструкций (НИИСК), г. Киев.

Определяющими нагрузками на сваю, при расчете традиционных объектов – жилых и промышленных зданий, являются вертикальные нагрузки. При проектировании ряда специальных сооружений (подпорные стены, причальные и противооползневые сооружения) определяющей нагрузкой может являться нагрузка, нормальная к оси сваи. Справедливо отметить, что учет аварийных (сейсмических) воздействий также требует корректного моделирования работы свай фундаментов на восприятие значительных горизонтальных сил.

В практике проектирования чаще стали выполнять расчет по деформациям с использованием нелинейной механики грунтов. Основное преимущество заключается в возможности определения осадки фундаментов при давлении под подошвой фундаментов больше расчетного сопротивления грунта, в отличие от метода послойного суммирования. В этом случае используются более сложные модели грунта, с большим количеством определяемых опытным путем характеристик грунтов [3]. Для примера, приведена сводка характеристик грунта (параметров модели), которые необходимо определить, если требуется выполнить расчет осадки с использованием упрочняющейся модели грунта программы PLAXIS – «Hardening soil»:

- Удельный вес сухого грунта.
- Секущий модуль деформации при консолидировано-дренированном испытании при трехосном сжатии.
- Касательный модуль деформации при испытаниях в одометре.

- Модуль деформации при разгрузке.
- Показатель степени зависимости модуля деформации от напряжений.
- Сцепление.
- Угол внутреннего трения.
- Угол дилатансии.
- Коэффициент Пуассона.
- Максимально возможное растягивающее напряжение.
- Начальный коэффициент пористости.
- Минимальный коэффициент пористости.
- Максимальный коэффициент пористости.
- Параметр асимптоты девиатора напряжений.

Как правило, при упрощенном моделировании грунтового основания, ограничиваются учетом модуля деформации грунта E , определяемом на стадии инженерных изысканий, в приборах компрессионного (одномерного) сжатия для напряжений порядка 0,1...0,2 МПа различая естественную влажность и вод насыщенное состояние. Для эпизодических и аварийных нагрузок используют прием, при котором задается модуль упругости грунта (упругий модуль деформации). Его значения совпадают с модулем деформации на вторичной ветви загрузки – E_v и по рекомендациям актуализированной редакция СНиП 2.02.01-83* «Основания зданий и сооружений» допускается принимать в пределах (5...6) E . По рекомендациям [1] эта величина именуется модулем обратимой деформации и ее значение допускается принимать в пределах (4...8) E .

Для сравнения, ниже приведены несколько различных способов моделирования работы сваи в грунте, реализованные в расчётных схемах, созданных в ПО «SCAD». За основу приняты данные [4]. Расчетная схема моделирует проведение испытания буронабивной сваи диаметром 500 мм, длиной 12,6 м, горизонтальной силой, величиной 170 кН. Инженерно-геологический разрез представлен на рис.1 и включает следующие инженерно-геологические элементы (сверху вниз): супесь лессовая, суглинок лессовидный, суглинок лессовидный легкий, суглинок тяжелый, мергель рыхлый, известняк-ракушечник выветрелый, известняк-ракушечник трещиноватый.

Схема 1. (Линейная постановка). Элементы, моделирующие сваю (стержни) и элементы, моделирующие грунтовую среду (пластины) сопряжены в узлах. Значения модулей деформации элементов, моделирующих грунтовую среду, приняты по данным инженерно-геологических изысканий. Для известняков принято значение $E=25$ МПа [5].

Схема 2. Для описания контакта стержневых элементов, моделирующих сваю и пластинчатых элементов, моделирующих грунтовое основание, введены нелинейные элементы – односторонние связи. Жёсткость элементов выбиралась произвольной, значительно превышающей жёсткости элементов стержней – сваи. Условие отключения связи – возникновение растягивающих усилий.

Схема 3. Аналогично схеме 1. Значения модулей деформации элементов, моделирующих грунтовую среду, приняты как $E_v=6 E$. Для известняков принято значение $E=100$ МПа.

Схема 4. Аналогично схеме 2. Значения модулей деформации элементов, моделирующих грунтовую среду, приняты как $E_v=6 E$. Для известняков принято значение $E=100$ МПа. Результаты расчета приведены в таблице 1.

На рис. 2 представлены изополя вычисленных горизонтальных напряжений, возникающих в моделируемом грунтовом массиве под действием приложенной к голове сваи нагрузки для расчетных схем №№ 3, 4.

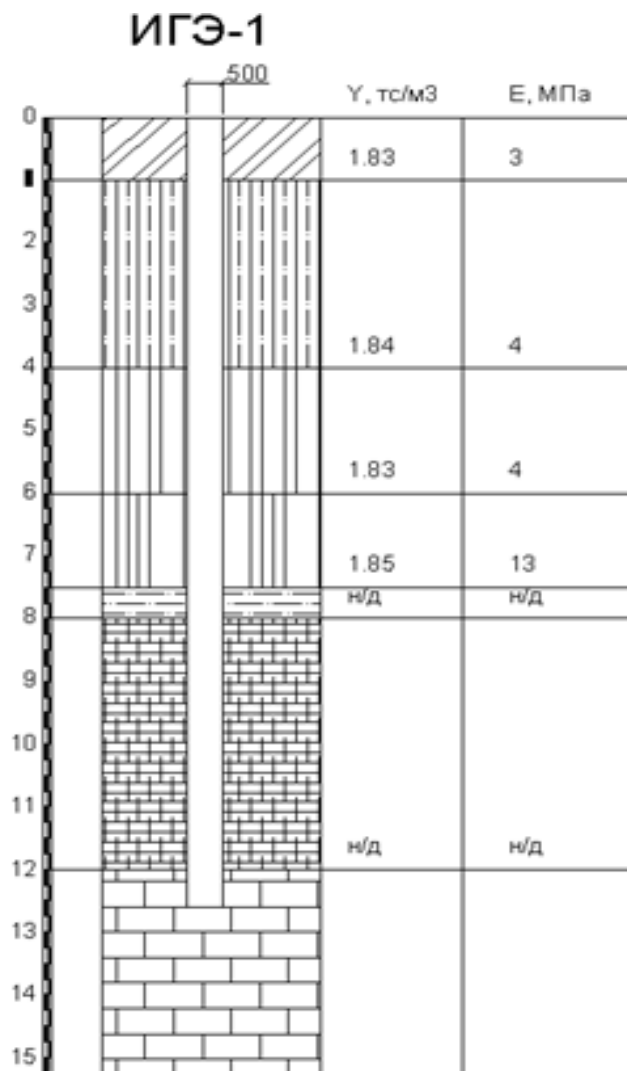


Рис.1 Инженерно-геологический разрез

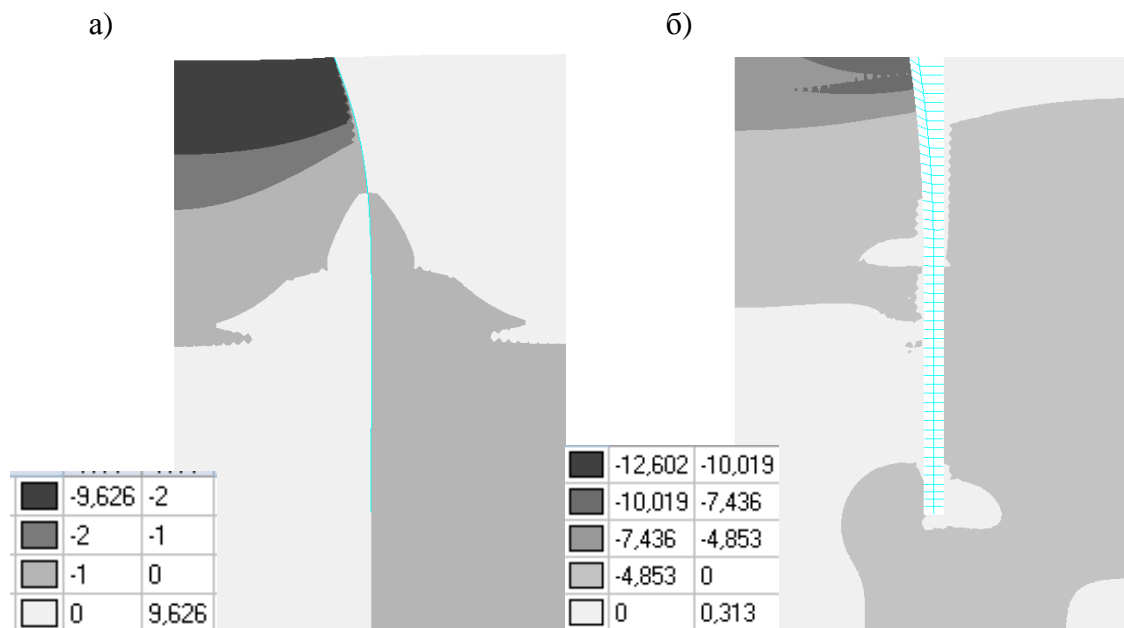


Рис. 2 Изополя вычисленных горизонтальных напряжений, т/м²:
а – схема № 3; б – схема № 4

Таблица 1 – Результаты расчета

№ схемы	Перемещения, мм	Максимальный момент, тс×м
1	49,733	19,436
2	91,757	26,843
3	11,88	10,762
4	23,896	15,902
Данные испытаний	10	-

Как видно, наиболее близкие, к результатам натурных испытаний по перемещениям, результаты дает схема № 3. При этом картина деформаций и, как следствие, НДС грунтового массива, качественно, отображает реальную работу конструкции на схеме №4. Величина напряжений возникающих в элементах, моделирующих грунтовой массив, не превышает 0,2 МПа («стандартный» интервал определения модуля деформации при лабораторном определении физико-механических свойств грунтов в лабораторных условиях 0,1...0,2 МПа).

Выводы. Выполнено сравнение результатов численного моделирования испытания свай горизонтальной нагрузкой с натурными измерениями по еще нескольким площадкам по методикам, аналогичным приведенным выше. В целом, сохраняется общая тенденция по наилучшей сходимости результатов при использовании подхода, реализованного при создании схемы №3. Это хорошо согласуется с принятой практикой ужесточения основания (увеличения жесткостей элементов, моделирующих сваи, увеличения коэффициентов постели упругого основания и т.п.) при расчете на сейсмические воздействия.

Литература

1. Ватин Н.И. Совместный расчет здания и фундамента мелкого заложения в SCAD [Электронный ресурс] / Н.И. Ватин, А.А. Мойся // Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. // elib.spbstu.ru/dl/1382.pdf/info?lang=en.
2. ДБН В.2.1-10-2009. Основания и фундаменты сооружений. – Киев, Минрегионстрой Украины, 2009. – 104 с.
3. Болдырев Г.Г. Интерпретация результатов лабораторных испытаний с целью определения деформационных характеристик грунтов. [Электронный ресурс] / Г.Г. Болдырев, А.В. Мельников, А.Г. Новичков // Независимый электронный журнал «ГеоИнфо» // geoinfo.infodesigner.ru/files/deformacii_gruntov.pdf.
4. Заключение (окончательное) по результатам испытаний грунтов буронабивными сваями статической вдавливающей, выдергивающей и горизонтальной нагрузками на площадке строительства объекта «Многоэтажный жилой комплекс с подземным паркингом по адресу: г. Одесса, Гагаринское плато, 5/1, участок «Б». Шифр объекта 4174 от 12.09.2013. Научный руководитель С.И. Кушак. – Одесса, 2013. (Архив НИЧ ОГАСА).
5. Тугаенко Ю.Ф. Исследование свойств известняка-ракушечника в полевых и лабораторных условиях / Ю.Ф. Тугаенко, А.П. Ткалич, В.А. Новский. // Труды международной конференции по геотехнике. Геотехнические проблемы мегаполисов. – Москва, 2010. – Том 4. – С.1395-1400.

Стаття надійшла 11.05.2017