

УДК 624.154

К ВОПРОСУ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ БУРОВЫХ СВАЙ НА ВЫДЕРГИВАЮЩИЕ НАГРУЗКИ

С.В. Табачников, ст. преп., к.т.н., Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова,
А.В. Самородов, доц., к.т.н., Харьковский национальный университет строительства и архитектуры

Аннотация. Выполнены в ПК Plaxis моделирование и расчет методом конечных элементов (МКЭ) напряженно-деформированного состояния (НДС) системы «грунтовое основание – свайный анкер» и проведен сравнительный анализ с результатами испытания грунтов натурной выдергиваемой сваей.

Ключевые слова: свая, анкер, выдергивающая нагрузка, грунтовое основание, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние.

ДО ПИТАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ БУРОВИХ ПАЛІ НА ВИСМИКУВАЛЬНІ НАВАНТАЖЕННЯ

С.В. Табачніков, ст. викл., к.т.н., Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова,
О.В. Самородов, доц., к.т.н., Харківський національний університет будівництва та архітектури

Анотація. Виконано в ПК Plaxis моделювання та розрахунок методом скінченних елементів (МСЕ) напружено-деформованого стану (НДС) системи «грунтова основа – пальовий анкер» та проведено порівняльний аналіз із результатами випробування натурної висмикувальної палі.

Ключові слова: паля, висмикувальне навантаження, грунтова основа, метод скінченних елементів, напружено-деформований стан.

TO THE QUESTION OF MATHEMATICAL MODELING OF BORED PILES WORK WITH UPWARD LOADING

S. Tabachnikov, Asst. Prof., Ph. D.(Eng.),
O.M. Beketov Kharkiv National University of Urban Economy,
A. Samorodov, Assoc. Prof., Ph. D. (Eng.),
Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture

Abstract. Modeling and calculation of the tensely deformed state (TDS) of the system «soil base – pile anchor» by the finite elements method (FEM) in PC Plaxis were performed and the comparison analysis with the soil test results by a natural extract pile was conducted.

Key words: pile, upward loading, soil base, finite elements method, tensely deformed state.

Введение

Существует широкий класс фундаментных конструкций на сваях, воспринимающих как вдавливающие, так и выдергивающие

нагрузки, например, фундаменты оттяжек и башенных сооружений, фундаменты выносных опор стадионов (рис. 1), опоры линий электропередач, фундаменты ветрогенераторов и придорожных конструкций, внецен-

тренно нагруженные фундаменты под колонны промышленных зданий, а также анкерные сваи, используемые в конструкциях испытательных стендов и др.



Рис. 1. Выносные опоры стадиона

При этом, как правило, применяют буровые сваи больших диаметров.

Анализ публикаций

В работах [1–4] авторами приводятся удовлетворительные результаты применения метода конечных элементов, реализованного в ПК Plaxis, для моделирования испытаний грунтов натурными сваями при их вдавливании в грунтовые массивы, в том числе с использованием различных моделей грунтового основания и условий контакта «свая – грунт». Однако в существующих источниках практически отсутствуют методики моделирования работы свай на действие выдергивающих нагрузок в широко применяемых расчетных комплексах, поэтому численные исследования НДС системы «грунтовое основание – свайный анкер» являются актуальным направлением в механике грунтов и свайном фундаментостроении.

Так как критерием моделирования является максимальная сходимость численных и физических результатов, то в качестве исходных данных использованы результаты полевых испытаний буроинъекционной сваи длиной 12,0 м и диаметром Ø630 мм на вертикальные выдергивающие нагрузки (рис. 2), проведенных при реконструкции стадиона «Металлист» в г. Харькове [5].

Испытания 12-метровой буроинъекционной сваи Ø630 мм проводились в грунтах природной влажности. Физико-механические свойства грунтов приведены в табл. 1.

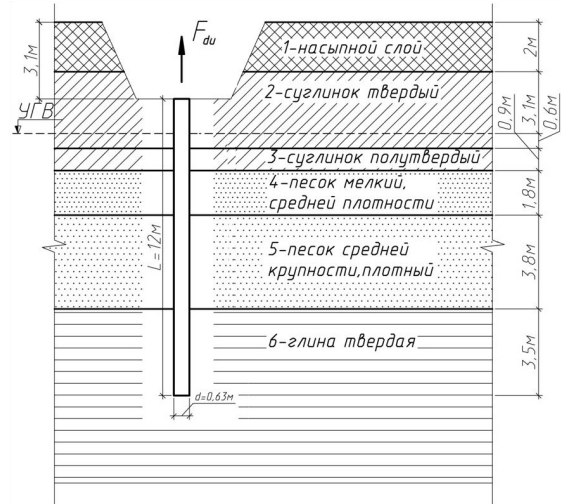


Рис. 2. Расчетная схема расположения сваи в грунтовом массиве

Таблица 1 Физико-механические свойства грунтов к расчетной схеме на рис. 2

Усл. обознач.	Ед. изм.	Слой					
		1 – насыпной грунт	2 – суглинок твердый	3 – суглинок полутвердый	4 – песок мелк., средн. плотн.	5 – песок средней крупн., плотн.	6 – глина тверд.
γ	кН/м ³	16,3	19,1	20,1	18,0	20,0	17,6
γ_{sat}	кН/м ³	–	20,4	20,6	21,2	22,9	–
γ_s	кН/м ³	–	27,1	27,1	26,6	26,6	27,4
γ_{sb}	кН/м ³	–	10,7	11,2	10,1	10,3	–
w	д.ед.	–	0,14	0,17	0,06	0,06	–
e	д.ед.	–	0,60	0,53	0,65	0,55	0,82
c	кПа	–	35	40	8	8	23
ϕ	град.	–	24	25	36	38	22
E	МПа	–	20	28	32	40	15
I_L	д.ед.	–	0	0,15	–	–	0,1
I_P	д.ед.	–	0,1	0,11	–	–	0,16

Слой №6 является глиной твердой (глиной зеленой, темнозеленой, твердой). Слой принадлежит к глинам палеогенового возраста, имеет значение показателя пластичности, равное 0,16, которое по нормативным документам соответствует суглинкам.

Испытания проводились с помощью стенда анкерного СА-600 (рис. 3)



Рис. 3. Положение стенда в процессе испытаний: 1 – стенд анкерный СА-600; 2 – гидродомкраты; 3 – насосные станции с манометрами; 4 – реперная система с измерительными приборами; 5 – опытная свая

Конструкция анкерного стенда СА-600 анкерилась в грунт с помощью шести рядом расположенных буроинъекционных свай.

Цель и постановка задачи

Целью статьи является предложение методики адекватного математического моделирования взаимодействия грунтового массива со сваями, работающими на выдергивающие нагрузки. Задачей исследований является моделирование и численный анализ НДС системы «грунтовое основание – свайный анкер» и сравнение с результатами натурных испытаний грунтов свай.

Методика математического моделирования взаимодействия грунтового массива со сваями, работающими на выдергивающие нагрузки

В соответствии с расчетной схемой (рис. 2) была создана аналогичная модель с помощью программного комплекса «Plaxis 3D Foundation» (версия 1.6), в которой сплошная область рассматривается как совокупность конечного числа элементов. Для исключения влияния на результаты расчета граничных условий модели была выбрана область $10 \times 10 \times 25,1$ м неоднородного строения с применением объемных 15-узловых клиновидных элементов, которые обеспечивают для перемещений интерполяцию четвертого порядка и используют численные интегрирования по двадцати точкам напряжений. Моделирование напряженно-деформированного состояния грунта проводилось с ис-

пользованием нелинейной модели с критерием прочности Мора-Кулона (М-К). Для конструкции сваи использовалась линейно-упругая модель материала.

Массив грунта моделировался в соответствии с основными физико-механическими характеристиками грунта (табл. 1): удельный вес грунта γ , кН/м^3 ; удельный вес водонасыщенного грунта γ_{sat} , кН/м^3 ; удельное сцепление грунта c , кПа ; угол внутреннего трения грунта ϕ , град.; модуль деформации грунта E , кПа ; коэффициент Пуассона ν , ед., принимался для песков равным 0,3, для суглинков – 0,35, для глины – 0,42 (табл. 2). Свая моделировалась объемной (*Massive circular pile*) диаметром $\varnothing 0,63$ м, взаимодействующей с грунтом посредством специальной внешней оболочки элементов на поверхности контакта «свая–грунт» (*Outside interface*), со следующими параметрами линейно-упругой модели материала (Л-У): удельный вес бетона С20/25 (В25) γ , кН/м^3 ; модуль упругости E , кПа ; коэффициент Пуассона ν , ед. (табл. 2). Уровень грунтовых вод моделировался на 1,4 м ниже отметки 0.00 сплошной области модели основания.

Поверхности контакта моделировались путем подбора величины коэффициента снижения прочности $R_{inter}=0,7 \div 1,0$. Этот коэффициент связывает прочность оболочки элементов на поверхности контакта «свая–грунт», т.е. трение на поверхности сваи и адгезию с прочностью грунта – углом трения и сцепления. В качестве эталонной модели рассматривалась модель с коэффициентом $R_{inter}=0,7$, что согласуется с коэффициентом условий работы грунта по боковой поверхности γ_{ef} буроинъекционной сваи большого диаметра в соответствующих грунтах [7].

При моделировании работы сваи на выдергивающие нагрузки была проведена серия расчетов с одинаковыми параметрами модели, но различным приложением нагрузки. Нагрузка прикладывалась как ступенями, что полностью соответствовало методике проведения полевых испытаний, так и сразу максимальным значением, которое соответствовало предельной нагрузке, вызвавшей непрерывное увеличение перемещения сваи без ее стабилизации – «срыв» сваи. Анализ результатов показал, что способ приложения нагрузки не имеет принципиального значения, так же как и точка приложения нагрузки (голова или пята).

Таблица 2 Свойства материалов грунта и сваи

Параметр	Обознач.	Ед. изм.	1 – насыпной грунт	2 – суглинок твердый	3 – суглинок полутв.	4 – песок мелк., средн. плотн.	5 – песок средн. крупн., плотн.	6 – глина твердая	Свая
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Модель материала	Model	М-К	М-К	М-К	М-К	М-К	М-К	М-К	Л-У
Структурный параметр грунта (свай)	Type	–	Дренир.	Дренир.	Дренир.	Дренир.	Дренир.	Не дренир.	Непор.
Удельный вес грунта	γ_{unsat}	кН/м ³	16,3	19,1	20,1	18,0	20,0	17,6	24,0
Удельный вес водонасыщенного грунта	γ_{sat}	кН/м ³	16,3	20,4	20,6	21,2	22,9	17,6	–
Модуль деформации грунта	E	кПа	8000	20000	28000	32000	40000	15000	$29,2 \cdot 10^6$
Коэффициент Пуассона	ν	ед.	0,35	0,35	0,35	0,3	0,3	0,42 (0,35)	0,2
Удельное сцепление грунта	c	кПа	20	35	40	8	8	23	–
Угол внутреннего трения грунта	φ	град.	20	24	25	36	38	22	–
Угол дилатансии ($0 \leq \psi \leq \varphi - 30^\circ$)	ψ	град.	0	0	0	6	8	0	–
Коэффициент снижения прочности в интерфейсе	R_{inter}	ед.	1,0	1,0; 0,7	1,0; 0,7	1,0; 0,7	1,0; 0,7	1,0; 0,7	1,0

На рис. 4 приведена модель массива грунта, выполненная в соответствии с расчетной схемой (рис. 2).

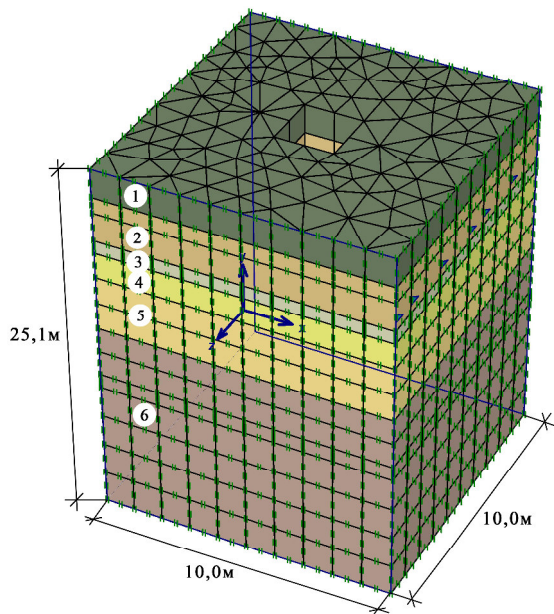


Рис. 4. Модель массива грунта

На рис. 5 приведена модель массива грунта со свай, выполненной с отметки котлована, в разрезе.

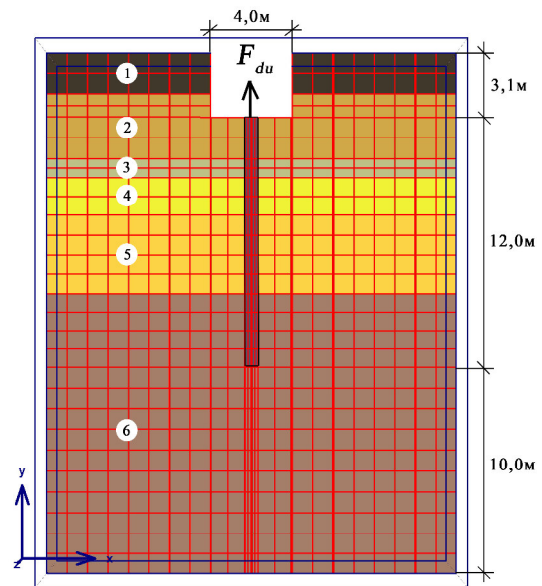


Рис. 5. Разрез массива грунта со свай

Формирование напряженно-деформированного состояния системы «массив – свая» при действии выдергивающих нагрузок состояло из следующих этапов (фаз):

Фаза 1 – нагружение расчетной области собственным весом грунта и формирование начального НДС грунтового массива (*Initial phase*);

Фаза 2 – условное моделирование котлована размерами в плане 4,0×4,0 м и глубиной 3,1 м и моделирование сваи Ø630 мм и $L=12$ м; Фаза 3 – приложение выдерживающей нагрузки, равной $F_{du}=1020$ кН, соответствующей предельной выдерживающей нагрузке при натурных испытаниях.

После первой и второй фаз перемещения грунта и сваи обнулялись путем включения функции *Reset displacement to zero*.

Для построения кривой и оценки разности перемещений выбирались две точки: точка А – в уровне головы сваи; В – в уровне нижнего конца сваи. Следует отметить, что по результатам расчета средняя разность между перемещениями точек А и В составила ≈ 1 мм.

В результате моделирования и расчета получена визуальная картина перемещений в виде изополей на разрезе (рис. 6).

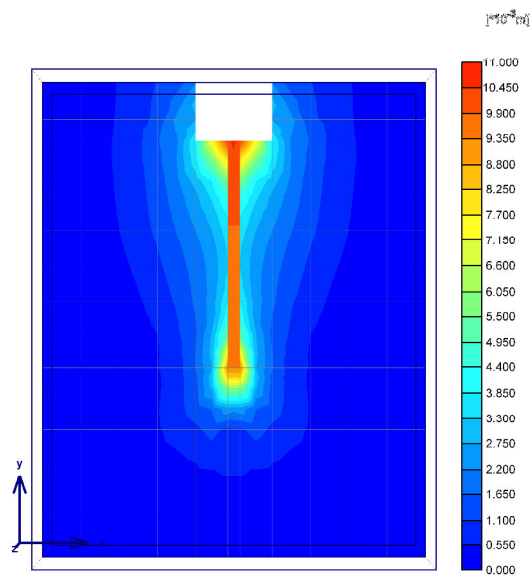


Рис. 6. Перемещения сваи и грунта при $R_{inter}=0,7$

Из картины перемещений расчетной модели (рис. 6) видно, что в работу включается грунт, находящийся под нижним концом сваи, препятствуя развитию перемещений и вытягиваясь вслед за свайей. Область развития перемещений распространяется примерно на 4,0 м ниже подошвы сваи. С целью исключения данного фактора моделирование массива грунта ниже пяты сваи на глубину 4,0 м в пределах её диаметра выполнено в виде эластичного материала (рис. 7) с некоторыми заниженными параметрами линейно-упругой модели материала (Л-У): удельный

вес $\gamma=12,0$, кН/м³; модуль упругости $E=1000,0$, кПа; коэффициент Пуассона $\nu=0,499$, ед. Материал моделировался с использованием инструмента *Massive circular pile* с коэффициентом снижения прочности в интерфейсе, равным $R_{inter}=0,1$.

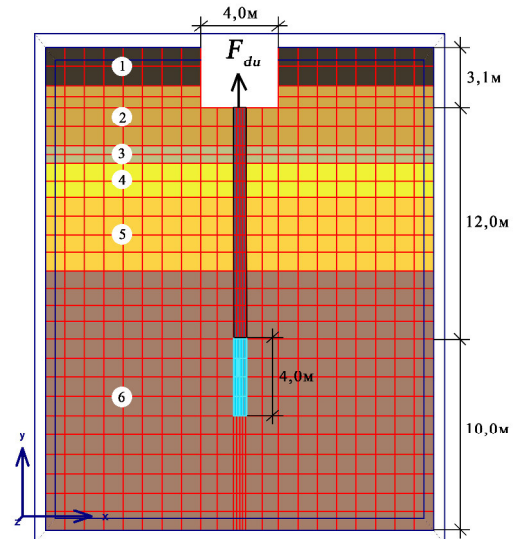


Рис. 7. Разрез массива грунта с эластичным материалом под пятой сваи с заниженными механическими свойствами

Такой прием позволил несколько снизить включение грунта под пятой сваи, что больше соответствует реальному процессу деформирования (рис. 8).

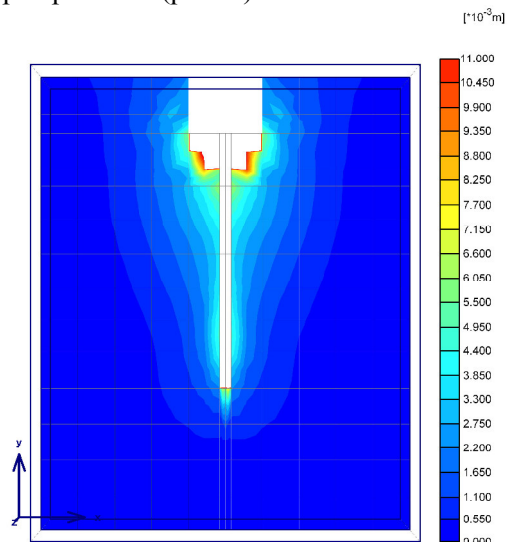


Рис. 8. Перемещения сваи и грунта при $R_{inter}=0,7$ и эластичным материалом под пятой сваи (зависимость 4 на графике)

На рис. 9 показаны графики зависимости перемещения исследуемой сваи от выдерживающей нагрузки, которые сопоставлены с графиком при натурных испытаниях.

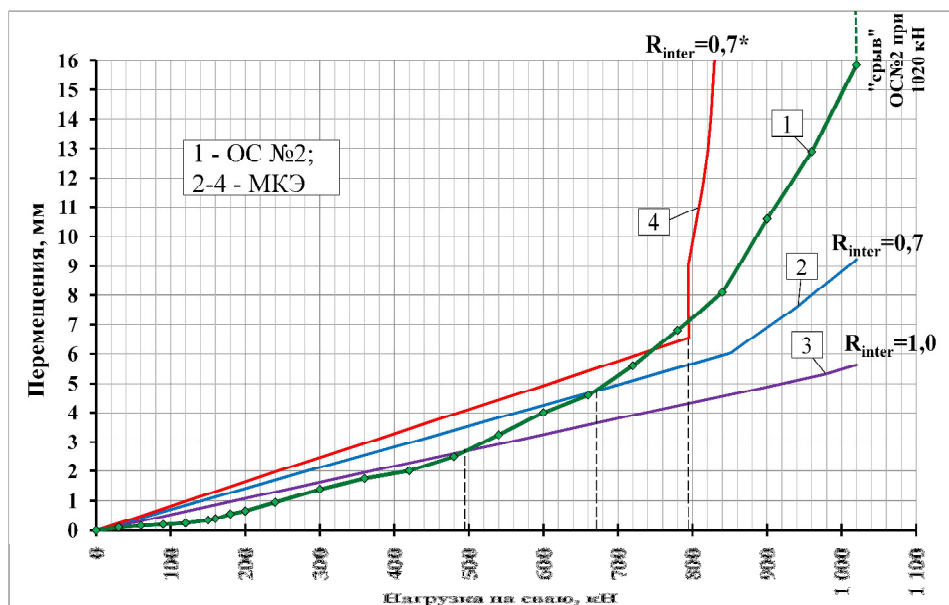


Рис. 9. Графики зависимости вертикального перемещения сваи от выдергивающей нагрузки F_{du} (ОС №2) и численного моделирования (Plaxis 3D)

В соответствии с ДСТУ [6] частное значение предельного сопротивления составило $F_{i1}=960$ кН, т.е. равно нагрузке, принятой на одну ступень меньше от нагрузки, вызвавшей непрерывное увеличение перемещений сваи – её срыв. Несущая способность по результатам полевых испытаний натурной сваи на действие выдергивающих нагрузок при этом равна $F_d=768$ кН, а расчетная нагрузка N на сваю, согласно ДБН [7], будет иметь еще меньшие значения.

Полученные на основании численного решения в ПК Plaxis зависимости 2–4 перемещений от нагрузки до 768 кН, что соответствует пределу практически линейной зависимости перемещений от нагрузки как при натуральных испытаниях, так и при моделировании рассмотренными методиками, являются достаточно близкими к результатам, полученным при натуральных испытаниях. Дальнейшее завышение несущей способности сваи и линейный характер зависимости, возможно, объясняется возникновением растягивающих усилий в грунте под пятой сваи, что не соответствует реальному процессу деформирования и ограничивает развитие перемещений (зависимости 2, 3).

Выводы

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Получено с помощью программного комплекса «Plaxis 3D Foundation» численное решение напряженно-деформированного состояния системы «грунтовое основание – свайный анкер» с использованием модели Мора-Кулона, результаты которого показывают возможность применения «классических» подходов моделирования для работы свай на выдергивающие нагрузки в пределах нагружений, не превышающих значений несущей способности F_d сваи согласно ДСТУ [6], полученных на основании полевых испытаний.
2. Необходимо проведение дальнейших исследований для адекватного моделирования работы свай на действие выдергивающих нагрузок, в том числе с применением других моделей грунтового основания.

Литература

1. Винников Ю.Л. Сравнение результатов математического моделирования с лотковыми испытаниями набивных свай в пробитых скважинах в составе ленточного ростверка / Ю.Л. Винников, И.В. Мирошниченко // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2013. – № 1. – С. 45–56.
2. Седин В.Л. Применение модели упрочняющегося грунта в численном моделировании буроинъекционных свай большого диаметра / В.Л. Седин // Геотехника. – 2014. – № 4. – С. 32–40.

3. Масєвська І.В. Чисельне моделювання роботи буроін'єкційної палі у піщаних грунтах / І.В. Масєвська, А.В. Романенко // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві: наук.-техн. збірник. – 2011. – №1. – С. 67–70.
4. Полищук А.И. Оценка несущей способности свай в глинистых грунтах с помощью ПК Plaxis 3D Foundation / А.И. Полищук // Вестник ТГАСУ. – 2013. – №3. – С. 351–359.
5. Исследование несущей способности четырех буроинъекционных свай вертикальной статической нагрузкой на площадке строительства стадиона «Металлист» в г. Харькове: отчет о НИР / ХГТУСА; исполн.: Самородов А.В. – Харьков, 2008. – 42 с.
6. Палі. Визначення несучої здатності за результатами польових випробувань: ДСТУ Б В.2.1-27:2010. – [Чинний від 2011–07–01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 11 с.
7. Основи та фундаменти споруд. Зміна №1: ДБН В.2.1–10–2009. – [Чинний від 2011–07–01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 55 с.

Рецензент: Е.С. Венцель, профессор, д.т.н., ХНАДУ.
