



УДК 624.154.1

Ю. С. ГРИГОРЬЕВ, канд. техн. наук, проф. кафедры архитектуры;
В. В. ФАТЕЕВ, доц. кафедры архитектуры

ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ГОРИЗОНТАЛЬНО НАГРУЖЕННЫХ ФУНДАМЕНТОВ С ЛИНЕЙНО РАСПОЛОЖЕННЫМИ ПРИЗМАТИЧЕСКИМИ СВАЯМИ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ “MIDAS”

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»
Россия, 603950, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65. Тел.: (831) 430-19-57;

эл. почта: yus-gri@rambler.ru, valeriy-fateev@rambler.ru

Ключевые слова: грунтовый массив, ряды призматических свай, горизонтальные нагрузки и перемещения, компьютерные модели.

Приводятся результаты исследований горизонтально нагруженных свайных фундаментов с линейно расположенными призматическими сваями в программном комплексе “MIDAS GTS NX”. Результаты выполненных исследований целесообразно использовать при проектировании свайных фундаментов и в расчетах свай как элементов железобетонных конструкций по прочности на образование и раскрытие трещин.

Необходимость исследований работы ленточных свайных фундаментов с передающимися на них горизонтальными нагрузками, действующими вдоль рядов свай, обусловлена потребностями строительства зданий и сооружений различного назначения на склоновых территориях; промышленных зданий и сооружений с большими горизонтальными нагрузками, передающимися на фундаменты; гидротехнических, противооползневых и противоселевых сооружений. Такого рода исследования взаимодействия забивных призматических свай с однородным грунтовым массивом в пространственной постановке были выполнены авторами с использованием программного комплекса “MIDAS GTS NX”, использующегося при проектировании различных, в том числе и уникальных объектов гражданского, промышленного и транспортного назначений [1].

Верификация геомеханической модели системы «свайный фундамент – грунтовое основание», использовавшаяся в исследованиях, была выполнена в соответствии с методикой, подробно описанной в нескольких работах, в которых в качестве основы авторами использовались результаты испытаний свай статическими вдавливающими нагрузками и результаты инженерно-геологических изысканий, выполненных на одном из участков застройки нагорной части Нижнего Новгорода [2–4].

Исследования выполнялись на моделях, состоящих из 1, 2 и 3 рядов свай соответственно с 4 и 6 сваями в каждом ряду (табл. 1).

При создании компьютерных моделей были выполнены следующие условия (рис. 1–3 цв. вклейки):

1. Для формирования расчетной области грунтового массива использовалась гибридная (комбинированная) форма сетки, состоящая из объемных элементов: 6 узловых тетраэдров и 8 узловых гексаэдров (рис. 1 цв. вклейки).

2. Околосвайная зона в виде фрагмента грунтового массива была сформирована из конечных элементов правильной формы – кубов с размером граней 0,15 м (рис. 2 цв. вклейки).

3. Призматические сваи длиной 6 м с поперечным сечением 0,3×0,3 м сфор-



мированы трехмерными пространственными элементами-кубами с размером граней 0,15 м (рис. 3 цв. вклейки).

Таблица 1

Расчетная модель	Количество свай в ряду	Количество рядов свай	Расстояние между рядами
1.1	4	1	-
1.2		2	$3d$
1.3		3	$3d$
1.4		2	$6d$
2.1	6	1	-
2.2		2	$3d$
2.3		3	$3d$
2.4		2	$6d$

4. Совместная работа призматических свай и околосовайного грунта, обеспечиваемая работой контактного слоя грунта, представляющего собой тонкую оболочку толщиной 10–100 мм с заданными физико-механическими свойствами, сформирована интерфейсными элементами, разделяющими связанные узлы между конечными элементами свай и грунта (рис. 3 цв. вклейки). Свойства контактных интерфейсных элементов описывались такими параметрами как: модуль нормальной жесткости; модуль сдвиговой жесткости; удельное сцепление; угол внутреннего трения; угол дилатансии и прочность грунта при растяжении.

5. Объемные силы от собственного веса свай и ростверка, собственного веса грунта основания были созданы программным комплексом автоматически с использованием введенных в программу значений объемного веса грунта и объемного веса материала свай и ростверка.

При выполнении численных расчетов были назначены граничные условия для закрепления и перемещений расчетной области:

- на верхней горизонтальной поверхности расчетной области – свободное перемещение узлов по всем направлениям;
- на вертикальных гранях – свободное перемещение в вертикальном направлении (вдоль оси Z) и запрет на горизонтальные перемещения (вдоль осей X и Y);
- на нижней горизонтальной плоскости – запрет на перемещения по всем направлениям.

Для моделирования работы однородного грунтового основания, сложенного суглинками, использовалась упругопластическая модель Мора-Кулона и характеристики глинистого грунта естественного сложения: удельный вес $\gamma = 18,6 \text{ кН/м}^3$; коэффициент пористости $e = 0,820$; коэффициент Пуассона $\nu = 0,37$; удельное сцепление $c = 20 \text{ кПа}$; угол внутреннего трения $\varphi = 22^\circ$; модуль деформации $E = 9,5 \text{ МПа}$, принятые по материалам инженерно-геологических изысканий.

В результате выполненных исследований работы однорядных свайных фундаментов было установлено:

1. Качественная картина работы горизонтально нагруженных моделей свайных фундаментов в полной мере соответствует работе свайных фундаментов в натурных испытаниях горизонтальными нагрузками [2]. При этом моделируемые фундаменты испытывают не только горизонтальные перемещения, развивающиеся в результате податливости основания и конечной жесткости свай, но и крен, возникающий из-за осадки свай, работающих на вдавливающую нагрузку,

**К СТАТЬЕ Ю. С. ГРИГОРЬЕВА, В. В. ФАТЕЕВА
«ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ГОРИЗОНТАЛЬНО НАГРУЖЕННЫХ
ФУНДАМЕНТОВ С ЛИНЕЙНО РАСПОЛОЖЕННЫМИ
ПРИЗМАТИЧЕСКИМИ СВАЯМИ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ
“MIDAS”»**

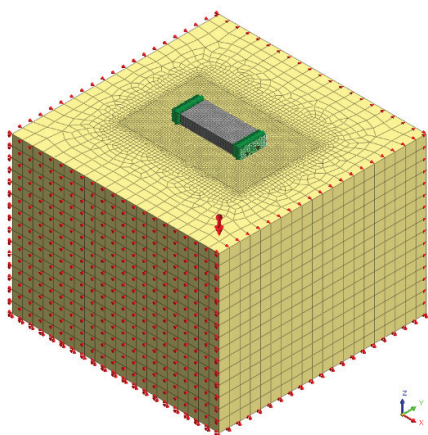


Рис. 1. Трехмерная компьютерная модель 2.3 системы «грунтовое основание – свайный фундамент»

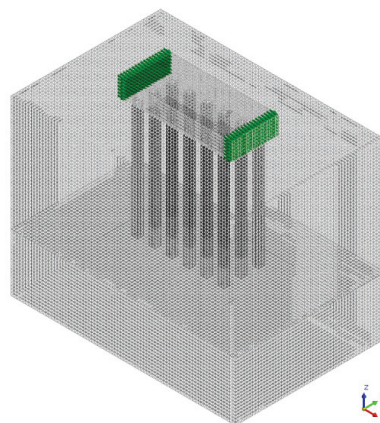


Рис. 2. То же, см. рис. 1. Сгущение сетки конечных элементов около свайного пространства

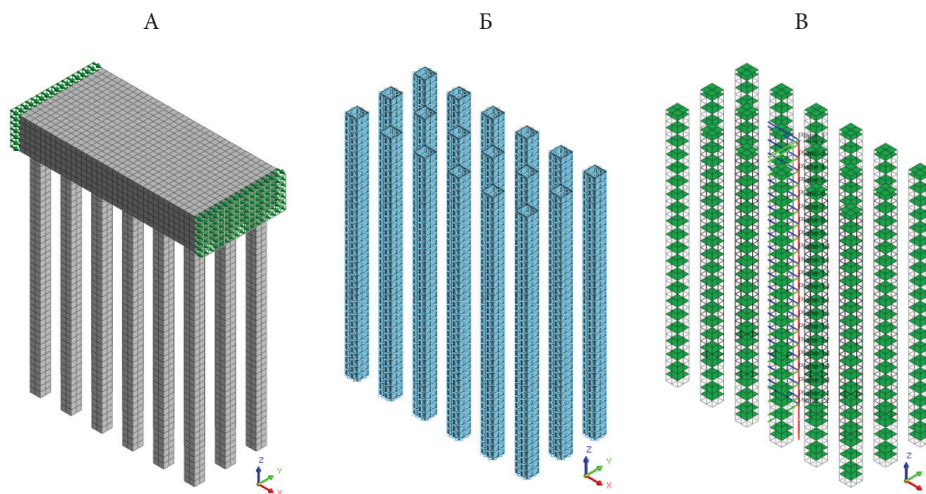


Рис. 3. Трехмерная компьютерная модель 2.3: А – Призматические сваи, объединенные жестким ростверком; Б – Интерфейсные элементы на контакте сваи с грунтом; В – Расчетные сечения по длине свай для определения внутренних усилий

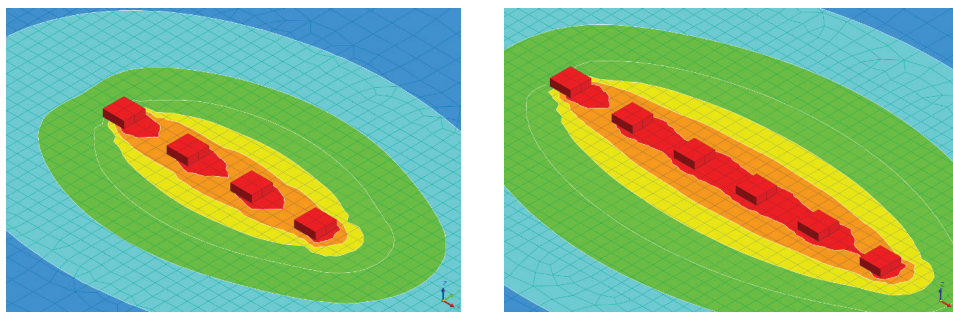


Рис. 4. Расчетные модели 1.1 и 2.1 (ряды из 4 и 6 свай). Изополя горизонтальных перемещений (по оси X) фундаментов и околосвайного грунта в уровне поверхности массива при действии горизонтальной нагрузки H , вызывающей горизонтальное перемещение свай $\Delta = 10$ мм

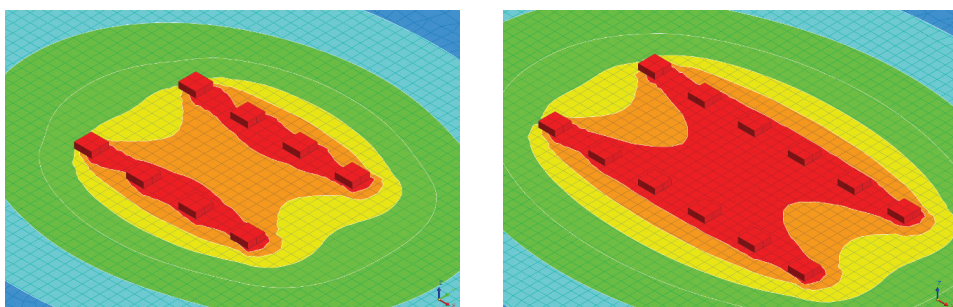


Рис. 5. Расчетные модели 1.4 и 2.4 (ряды из 4 и 6 свай). Изополя горизонтальных перемещений (по оси X) фундаментов и околосвайного грунта в уровне поверхности массива при действии горизонтальной нагрузки H , вызывающей горизонтальное перемещение свай $\Delta = 10$ мм

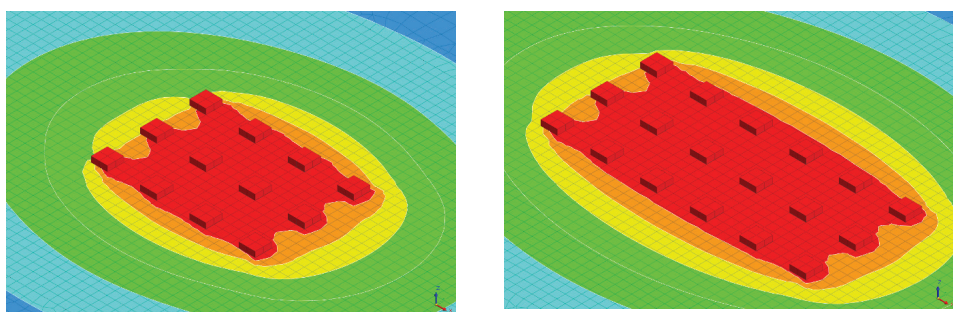


Рис. 6. Расчетные модели 1.3 и 2.3 (ряды из 4 и 6 свай). Изополя горизонтальных перемещений (по оси X) фундаментов и околосвайного грунта в уровне поверхности массива при действии горизонтальной нагрузки H , вызывающей горизонтальное перемещение свай $\Delta = 10$ мм

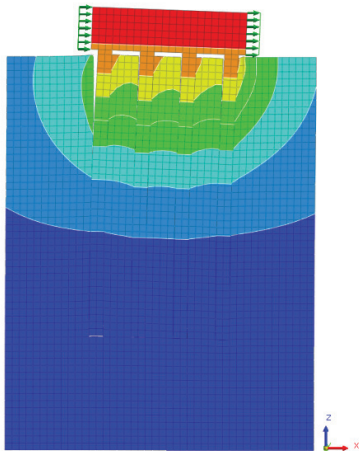


Рис. 7. Расчетная модель 1.1. Изополя горизонтальных перемещений (по оси X) ряда из 4 свай и околосвайного грунта при действии горизонтальной нагрузки H , вызывающей горизонтальное перемещение свай в уровне поверхности грунтового массива $\Delta = 10$ мм

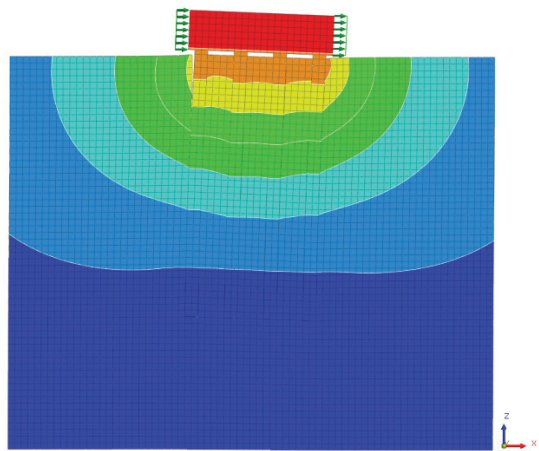


Рис. 8. Расчетная модель 1.4. Изополя горизонтальных перемещений (по оси X) среднего ряда из 4 свай и околосвайного грунта при действии горизонтальной нагрузки H , вызывающей горизонтальное перемещение свай в уровне поверхности грунтового массива $\Delta = 10$ мм

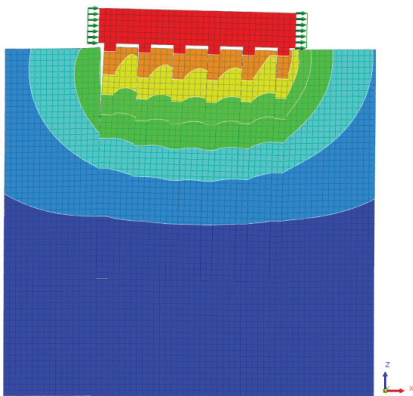


Рис. 9. Расчетная модель 2.1. Изополя горизонтальных перемещений (по оси X) ряда из 6 свай и околосвайного грунта при действии горизонтальной нагрузки H , вызывающей горизонтальное перемещение свай в уровне поверхности грунтового массива $\Delta = 10$ мм

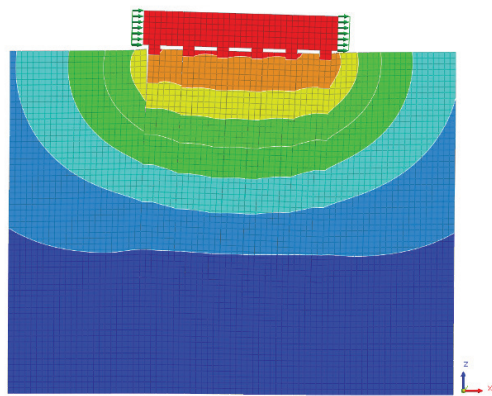


Рис. 10. Расчетная модель 2.4. Изополя горизонтальных перемещений (по оси X) среднего ряда из 6 свай и околосвайного грунта при действии горизонтальной нагрузки H , вызывающей горизонтальное перемещение свай в уровне поверхности грунтового массива $\Delta = 10$ мм

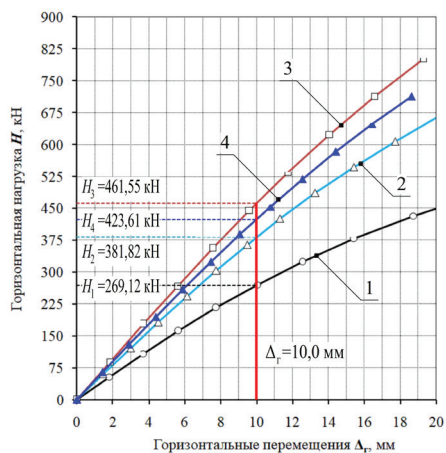


Рис. 11. Зависимость горизонтальных перемещений Δ_r , мм от горизонтальных нагрузок H , кН: 1–4 – расчетные модели 1.1–1.4 (ряды из 4 свай)

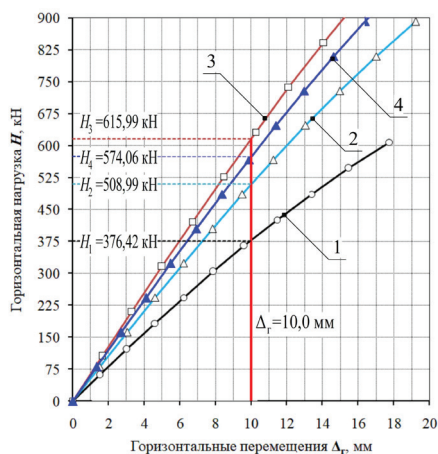


Рис. 12. Зависимость горизонтальных перемещений Δ_r , мм от горизонтальных нагрузок H , кН: 1–4 – расчетные модели 2.1–2.4 (ряды из 6 свай)

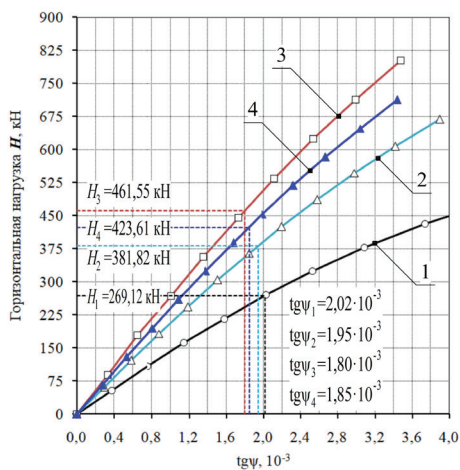


Рис. 13. Зависимость крена $\text{tg}\psi$, 10^{-3} от горизонтальных нагрузок H , кН: 1–4 – расчетные модели 1.1–1.4 (ряды из 4 свай)

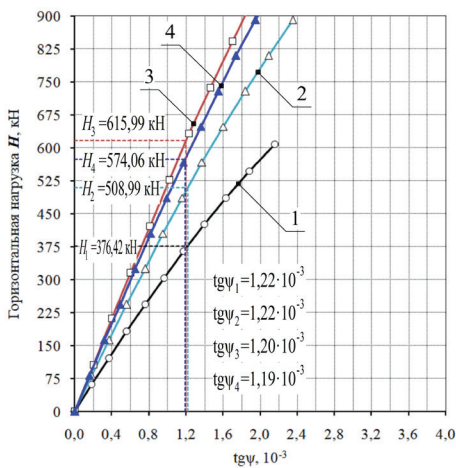


Рис. 14. Зависимость крена $\text{tg}\psi$, 10^{-3} от горизонтальных нагрузок H , кН: 1–4 – расчетные модели 2.1–2.4 (ряды из 6 свай)



и вертикальных перемещений свай, работающих на выдергивающую нагрузку (рис. 4–10 цв. вклейки).

2. При увеличении количества свай в ряду с 4 до 6 общее сопротивление фундамента воздействию горизонтальной нагрузки увеличивается, однако среднее значение горизонтальной нагрузки, приходящейся на одну сваю, снижается на 6,7 %: с 67,28 до 62,74 кН (табл. 2, 3; рис. 11–14 цв. вклейки). При этом за счет увеличения пространственной жесткости в плоскости действия нагрузки устойчивость фундамента из 6 свай, по сравнению с фундаментом из 4 свай, увеличивает-ся, а крен соответственно уменьшается на 39,6 %.

Исследованиями работы 2- и 3-рядных свайных фундаментов было установлено (табл. 2, 3; рис. 1–6):

1. При увеличении количества рядов свай в фундаменте до 2 и 3 с расстоянием между рядами равным $3d$ (d – размер стороны квадратного поперечного сечения сваи) общее сопротивление фундаментов действию горизонтальной нагрузки соответственно увеличивается (табл. 2, 3; рис. 1–4), однако, нагрузка, приходящаяся на один ряд свай, снижается из-за снижения реактивного сопротивления грунта, защемленного между рядами свай и перемещающегося вместе со сваями.

Таблица 2

Ряды из 4 свай			
Расчетная модель	Горизонтальная нагрузка H , кН	Нагрузка на ряд свай H_p , кН	Средняя нагрузка на сваю H_c , кН
1.1	269,12	269,12	67,28
1.2	381,82	190,91	47,73
1.3	461,55	153,85	38,46
1.4	423,61	211,81	52,95

Таблица 3

Ряды из 6 свай			
Расчетная модель	Горизонтальная нагрузка H , кН	Нагрузка на ряд свай H_p , кН	Средняя нагрузка на сваю H_c , кН
2.1	376,42	376,42	62,74
2.2	508,99	254,50	42,42
2.3	615,99	205,33	34,22
2.4	574,06	287,03	47,84

2. Средняя величина горизонтальной нагрузки, приходящейся на одну сваю в 2- и 3-рядных фундаментах снижается (табл. 2, 3; рис. 1, 2):

1) в 2 рядах из 4 свай – с 67,28 до 47,73 кН (29,1 %) и в 3 рядах – до 38,46 кН (42,8 %);

2) в 2 рядах из 6 свай – с 62,74 до 42,42 кН (32,4 %) и в 3 рядах – до 34,22 кН (45,5 %).

3. Увеличение расстояния между рядами с $3d$ до $6d$ при двухрядном расположении свай приводит к увеличению общего сопротивления 2-рядных фундаментов действию горизонтальной нагрузки по сравнению с 1-рядными фундаментами на 57,4 % (ряды из 4 свай) и на 52,5 % (ряды из 6 свай). Вместе с тем величина на-

грузки, приходящейся на 1 ряд, снижается на 21,3 % (для рядов из 4 свай) и на 23,8 % (для рядов из 6 свай), а среднее значение нагрузки на 1 сваю снижается соответственно на 21,3 % (в рядах из 4 свай) и на 23,8 % (в рядах из 6 свай) – табл. 2, 3; рис. 3, 4.

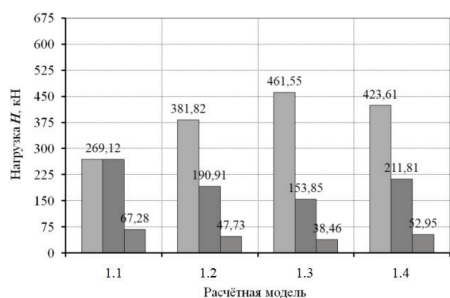


Рис. 1. Модели с рядами из 4 свай. Зависимость сопротивления фундаментов горизонтальным нагрузкам от количества рядов свай

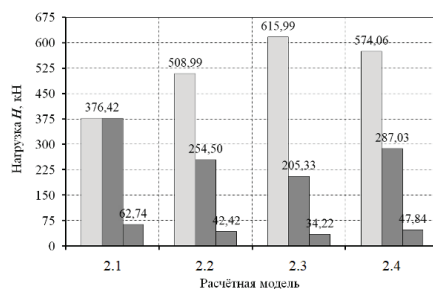


Рис. 2. Модели с рядами из 6 свай. Зависимость сопротивления фундаментов горизонтальным нагрузкам от количества рядов свай

4. Горизонтальная нагрузка распределяется между сваями, объединенными жестким недеформируемым ростверком, неравномерно. Наибольшие нагрузки приходятся на первую (лидирующую) и на последнюю (замыкающую ряд) сваю. При этом первая свая в ряду работает на максимальную вдавливающую нагрузку, а последняя свая работает на максимальную выдергивающую нагрузку. Горизонтальные нагрузки, приходящиеся на сваи, расположенные между крайними сваями, не превышают средней величины нагрузки (рис. 5, 6).

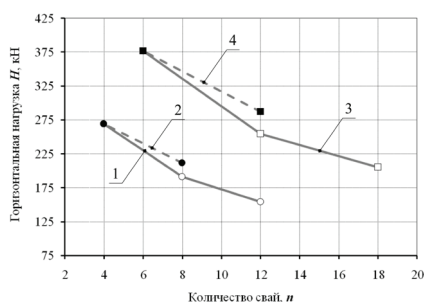


Рис. 3. Зависимости сопротивления рядов свай горизонтальным нагрузкам от количества рядов свай: 1, 2 – расчетные модели 1.1 и 1.4 при расстоянии между рядами соответственно $3d$ и $6d$; 3, 4 – расчетные модели 2.1 и 2.4 при расстоянии между рядами $3d$ и $6d$

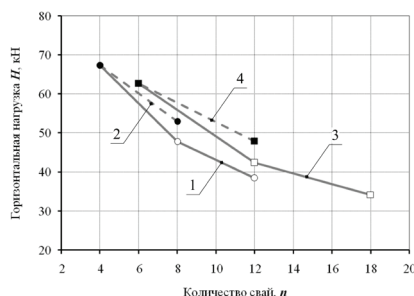


Рис. 4. Зависимости средней горизонтальной нагрузки, приходящейся на одну сваю, от числа свай в ряду: 1, 2 – расчетные модели 1.2 и 1.4 при расстоянии между рядами соответственно $3d$ и $6d$; 3, 4 – расчетные модели 2.1 и 2.4 при расстоянии между рядами $3d$ и $6d$.

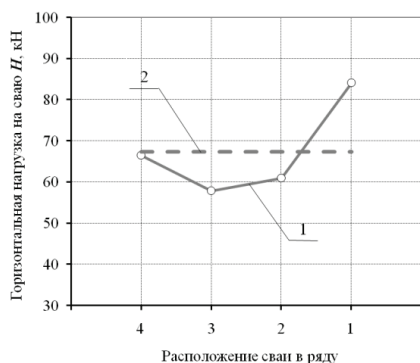


Рис. 5. Ряд из 4 свай: 1 – распределение горизонтальной нагрузки между сваями; 2 – среднее значение горизонтальной нагрузки, приходящейся на одну сваю

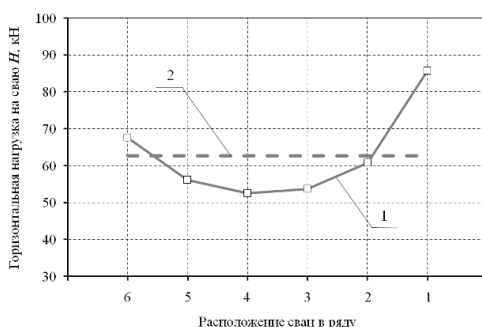


Рис. 6. Ряд из 6 свай: 1 – распределение горизонтальной нагрузки между сваями; 2 – среднее значение горизонтальной нагрузки, приходящейся на одну сваю

Выявленные выполненными исследованиями особенности работы горизонтально нагруженных фундаментов из линейно расположенных призматических свай необходимо учитывать при проектировании свайных фундаментов и в расчетах свай как элементов железобетонных конструкций по прочности и на образование и раскрытие трещин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Верификационный отчет по программному комплексу MIDAS GTS. Том 1. Общие сведения. Матрица верификации Подземпроект. – Москва : Подземпроект, 2012. – 88 с. – Текст : непосредственный.
2. Григорьев, Ю. С. Компьютерная модель работы свай в массиве глинистого грунта / Ю. С. Григорьев, В. В. Фатеев. – Текст : непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2022. – № 1 (61). – С. 36–41.
3. Григорьев, Ю. С. Верификация компьютерной модели забивной призматической сваи в многослойном грунтовом основании / Ю. С. Григорьев, В. В. Фатеев. – Текст : непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2022. – № 2 (62). – С. 79–84.
4. Григорьев, Ю. С. Верификация и валидация геомеханической модели грунтового основания деформирующегося здания / Ю. С. Григорьев, В. В. Фатеев. – Текст : непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2018. – № 3 (47). – С. 16–22.

GRIGOREV Yuri Semyonovich, candidate of technical sciences, professor of the chair of architecture; FATEEV Valery Valerevich, associate professor of the chair of architecture

INVESTIGATIONS OF THE FUNCTION OF HORIZONTALLY LOADED FOUNDATIONS WITH LINEARLY PLACED PRISMATIC PILES BY THE SOFTWARE PACKAGE "MIDAS"



Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering
65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603950, Russia. Tel.: +7 (831) 430-19-57;
e-mail: yus-gri@rambler.ru, valeriy-fateev@rambler.ru

Key words: soil base, lines of prismatic piles, horizontal loads and displacements, computer models.

The article presents the results of studies of horizontally loaded pile foundations with linearly arranged prismatic piles by the "MIDAS" software package. The results of the performed studies should be used in the design of pile foundations and in the calculations of piles as elements of reinforced concrete structures for strength to prevent formation and opening of cracks.

REFERENCES

1. Verifikatsionnyj otchyt po programmnomu kompleksu MIDAS GTS. Tom 1. Obschie svedeniya. Matritsa verifikatsii [MIDAS GTS Software Complex Verification Report. Volume 1. General information. Verification matrix]. ООО «Podzemproekt». – Moscow, 2012. 88 p.
2. Grigorev Yu. S., Fateev V. V. Computernaya model raboty visyachey prismaticeskoy svai v massive glinistogo grunta [Computer model of the operation of a hanging prismatic pile in an array of clay soil]. Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegor. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod. 2022. № 1 (61). P. 36–41.
3. Grigorev Yu. S., Fateev V. V. Verifikatsiya komputernoy modeli zabivnoy prizmaticheskoy svai v mnogosloynnom gruntovom osnovanii [Verification of a computer model of a driven prismatic pile in a multilayer soil base] Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegor. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod. 2022. № 2 (62). P. 79–84.
4. Grigorev Yu. S., Fateev V. V. Verifikatsiya i validatsiya geomekhanicheskoy modeli gruntovogo osnovaniya deformiruyuschegosya zdaniya [Verification and validation of a geomechanical model of a soil basis of a deforming building]. Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegor. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod. 2018. № 3. P. 16–22.

© Ю. С. Григорьев, В. В. Фатеев, 2022

Получено: 28. 06.2022 г.

УДК 699.841

Л. Ю. ТЯГУНОВА¹, ст. преп. кафедры оснований, фундаментов и инженерной геологии; И. В. ШКОДА^{1,2}, асс. кафедры теории сооружений и технической механики; К. И. АНИСЬКИНА¹, студент

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА БОЛЬШЕПРОЛЕТНОГО СООРУЖЕНИЯ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ В ГОРОДЕ СЕВАСТОПОЛЕ

¹ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»
Россия, 603950, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65. Тел.: (831) 430-54-94;
эл. почта: tyagunovaly@yandex.ru

²Институт проблем машиностроения РАН – филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»
Россия, 603024, г. Н. Новгород, ул. Белинского, д. 85. Тел.: (831) 432-05-76.

Ключевые слова: большепролетное покрытие, сейсмическая нагрузка, акселерограмма, землетрясение, динамический расчет, линейно-спектральный расчет.