



УДК 624.154.1

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

ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ МЕЖСВАЙНОГО И ОКОЛОСВАЙНОГО ГРУНТА В ГОРИЗОНТАЛЬНО НАГРУЖЕННЫХ МОДЕЛЯХ СВАЙНО-ГРУНТОВЫХ ДИАФРАГМ

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»
Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65. Тел.: (831) 430-19-57;
эл. почта: yus-gri@rambler.ru, valeriy-fateev@rambler.ru

Ключевые слова: глинистый грунт, модель грунтового массива, модель свайно-грунтовой диафрагмы, горизонтальные нагрузки, деформации, разрушение.

Приводятся результаты исследований работы горизонтально нагруженных моделей свайно-грунтовых диафрагм в массиве глинистого грунта. Результаты представлены в виде картограмм и фотофиксации расположения трещин на поверхности и по глубине разрушающегося грунтового массива, а также в виде изолиний плотности межсвайного грунта и околосвайного грунтового массива.

В выполненных экспериментах исследовались деформации и разрушение межсвайного и околосвайного грунта в горизонтально нагруженных моделях одиночных свай и свайно-грунтовых диафрагм, состоящих из 2, 4, 6 и 8 моделей свай длиной 60 см, испытывавшихся с учетом одобренной VIII международным конгрессом по механике грунтов и фундаментостроению методики испытаний малоразмерных моделей фундаментов [1], проходившем в 1973 году в Москве.

Горизонтальная нагрузка в испытаниях моделей свайно-грунтовых диафрагм, результаты которых опубликованы авторами в работах [2-5] ступенчато увеличивалась до величины горизонтального перемещения ростверка в уровне приложения нагрузки равного $\Delta_r = 1,0$ мм, принятой в качестве критерия в ряде исследований [6, 7], после чего нагрузка увеличивалась до состояния разрушения системы «свайный фундамент – грунтовое основание», что позволило выявить механизм совместной работы моделей свай и грунтового основания.

Для исследования деформированного состояния модели грунтового массива после завершения испытаний выполнялась срезка грунтового массива вертикальными слоями толщиной в 1 см, в процессе которой было установлено следующее (рис. 1–7 цв. вклейки):

1. Модели свай занимают положение строго в одной вертикальной плоскости, что подтверждает эффективность разработанной авторами методики погружения моделей свай в грунтовой массив (рис. 8 цв. вклейки).

2. В объеме грунтового массива от его наружной вертикальной плоскости до вертикальной плоскости, расположенной на расстоянии от боковой поверхности моделей свай, равном размеру поперечного сечения сваи d , не было обнаружено каких-либо искривлений горизонтальных меловых полос, что подтвердило однородность приготовленного для исследований модели массива из лессового суглинка [8].



Деформации грунтового массива были обнаружены лишь в объеме несущего околосвайного грунта шириной равной $3d$ и глубиной, превышающей глубину погружения модели сваи на $3d$ (рис. 8 цв. вклейки).

3. Увеличение горизонтальной нагрузки, передающейся как на одиночную сваю, так и свайно-грунтовую диафрагму, сопровождается образованием в массиве глинистого грунта поверхностных трещин, ширина и траектория развития которых увеличиваются по мере возрастания нагрузки. В этом случае наиболее приемлемым критерием для оценки сопротивления горизонтально нагруженных моделей фундаментов является величина горизонтальных перемещений фундамента, равная $\Delta_r=1,0$ мм.

4. Развитие горизонтальных перемещений свайно-грунтовых диафрагм влечет за собой: 1) отрыв тыльной (задней) поверхности свай от грунта, при этом в фундаментах, состоящих из 2, 4, 6 и 8 свай отрыв зафиксирован не только у последней сваи в ряду, но и существенно меньший по величине, отрыв от грунта остальных свай в ряду; 2) возникновение сил трения скольжения по боковой поверхности моделей свай, ориентированных вдоль направления действия горизонтальной нагрузки (табл. 1, рис. 1. цв. вклейки).

5. При достижении предельной величины несущей способности последней в свайно-грунтовой диафрагме сваи, работающей на выдергивание, происходит разрушение околосвайного грунта в объеме радиусом $1,5d$.

6. Увеличение количества свай в модели до 8 привело к снижению средней (удельной) величины сопротивления свай горизонтальным нагрузкам, что указывает на сложный механизм взаимного влияния свай в диафрагме и взаимодействия диафрагмы с грунтовым массивом, на что указывает и характер траекторий развития трещин как на поверхности, так и по глубине массива околосвайного грунта (рис. 1–7 цв. вклейки).

Таблица 1

Отрыв тыльной плоскости боковой поверхности свай в уровне поверхности грунта

| Тип фундамента/ порядковый номер сваи | Перемещение фундамента | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|------------------------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | $\Delta_r=1,0$ мм | | | | | | | | $\Delta_r=3,8-5,0$ мм | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Одиночная свая | 0,8 | - | - | - | - | - | - | - | 3,8 | - | - | - | - | - | - | - |
| Группа из 2 свай | 0,4 | 0,8 | - | - | - | - | - | - | 1,9 | 3,6 | - | - | - | - | - | - |
| Диафрагма из 4 свай | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,8 | - | - | - | - | 0,8 | 0,3 | 0,6 | 3,7 | - | - | - | - |
| Диафрагма из 6 свай | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,8 | - | - | 1,3 | 0,6 | 0,6 | 0,3 | 0,3 | 3,0 | - | - |
| Диафрагма из 8 свай | 0,1 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,2 | 0,8 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,5 | 3,3 |

Исследования плотности сложения околосвайного грунта были выполнены по завершении испытаний моделей свайно-грунтовых диафрагм методом отбора образцов грунта с помощью специально изготовленных латунных колец с тонкими стенками внутренним диаметром 30 мм и объемом вмещающегося в кольцо образца грунта 10 см^3 . Было установлено следующее (рис. 8, 9 цв. вклейки):

**К СТАТЬЕ Ю. С. ГРИГОРЬЕВА, В. В. ФАТЕЕВА
«ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ МЕЖСВАЙНОГО
И ОКОЛОСВАЙНОГО ГРУНТА В ГОРИЗОНТАЛЬНО НАГРУЖЕННЫХ
МОДЕЛЯХ СВАЙНО-ГРУНТОВЫХ ДИАФРАГМ»**

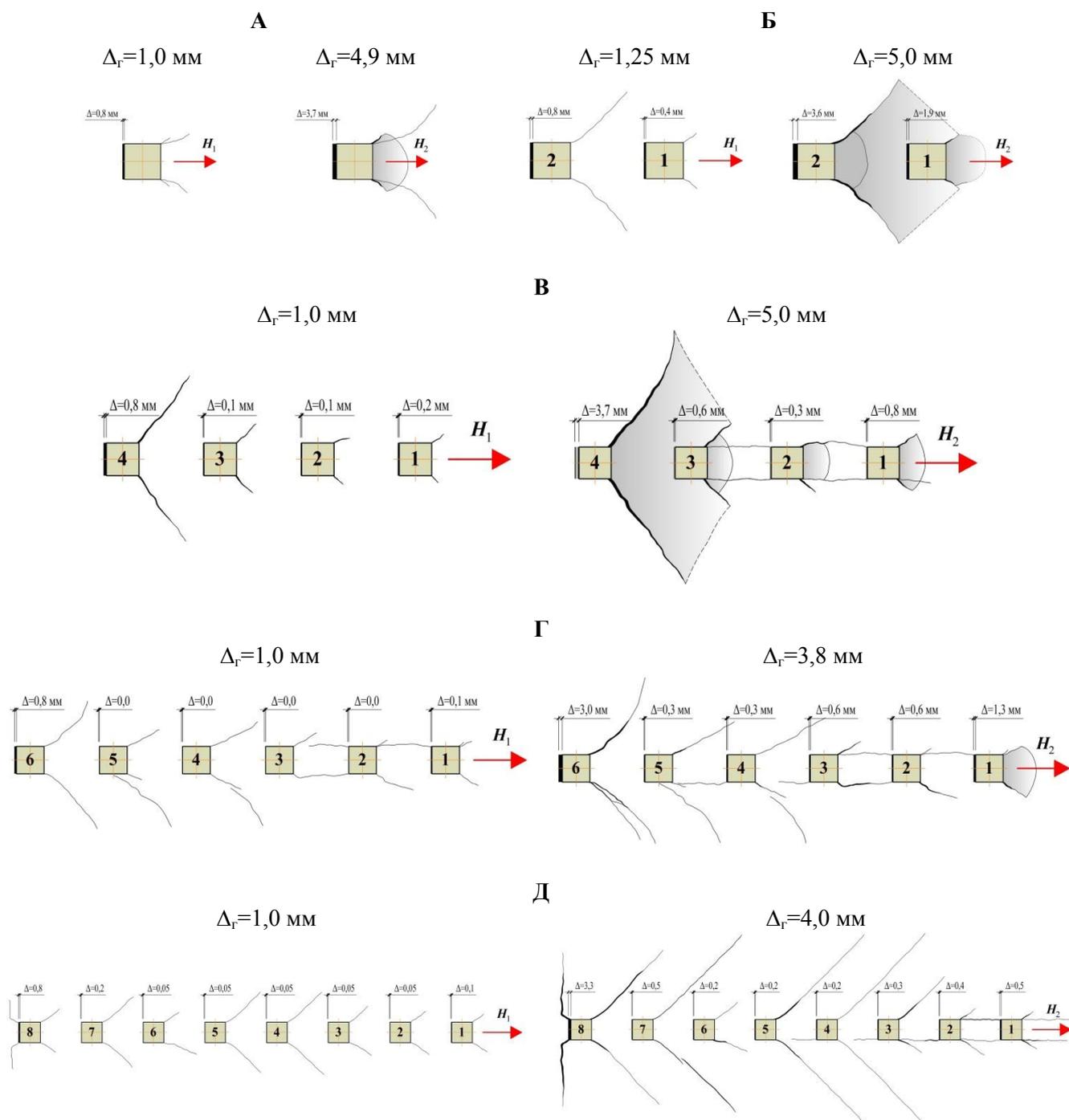


Рис. 1. Развитие трещин на поверхности массива околосвайного грунта при горизонтальном перемещении: А – одиночной сваи со свободной головой; Б – группы из 2 свай; В – свайно-грунтовой диафрагмы из 4 свай; Г – свайно-грунтовой диафрагмы из 6 свай; Д – свайно-грунтовой диафрагмы из 8 свай



Рис. 2. Отрыв тыльной части боковой поверхности сваи от грунта с трещинами в массиве грунта при горизонтальном перемещении сваи $\Delta_r=4,9$ мм



Рис. 3. Трещина в массиве грунта при горизонтальном перемещении группы из 2 свай $\Delta_r=5$ мм



Рис. 4. Трещина в массиве грунта при горизонтальном перемещении диафрагмы из 4 свай $\Delta_r=5$ мм и работы 2 последних свай на выдергивание



Рис. 5. Трещины в массиве грунта при горизонтальном перемещении диафрагмы из 6 свай $\Delta_r=3,8$ мм и работы 3 последних свай на выдергивание



Рис. 6. Трещины на поверхности массива грунта при горизонтальном перемещении диафрагмы из 8 свай $\Delta_r=4$ мм и работы 5 последних свай на выдергивание



Рис. 7. Трещины в глубине массива грунта при горизонтальном перемещении диафрагмы из 8 свай $\Delta_r=4$ мм и работы 5 последних свай на выдергивание

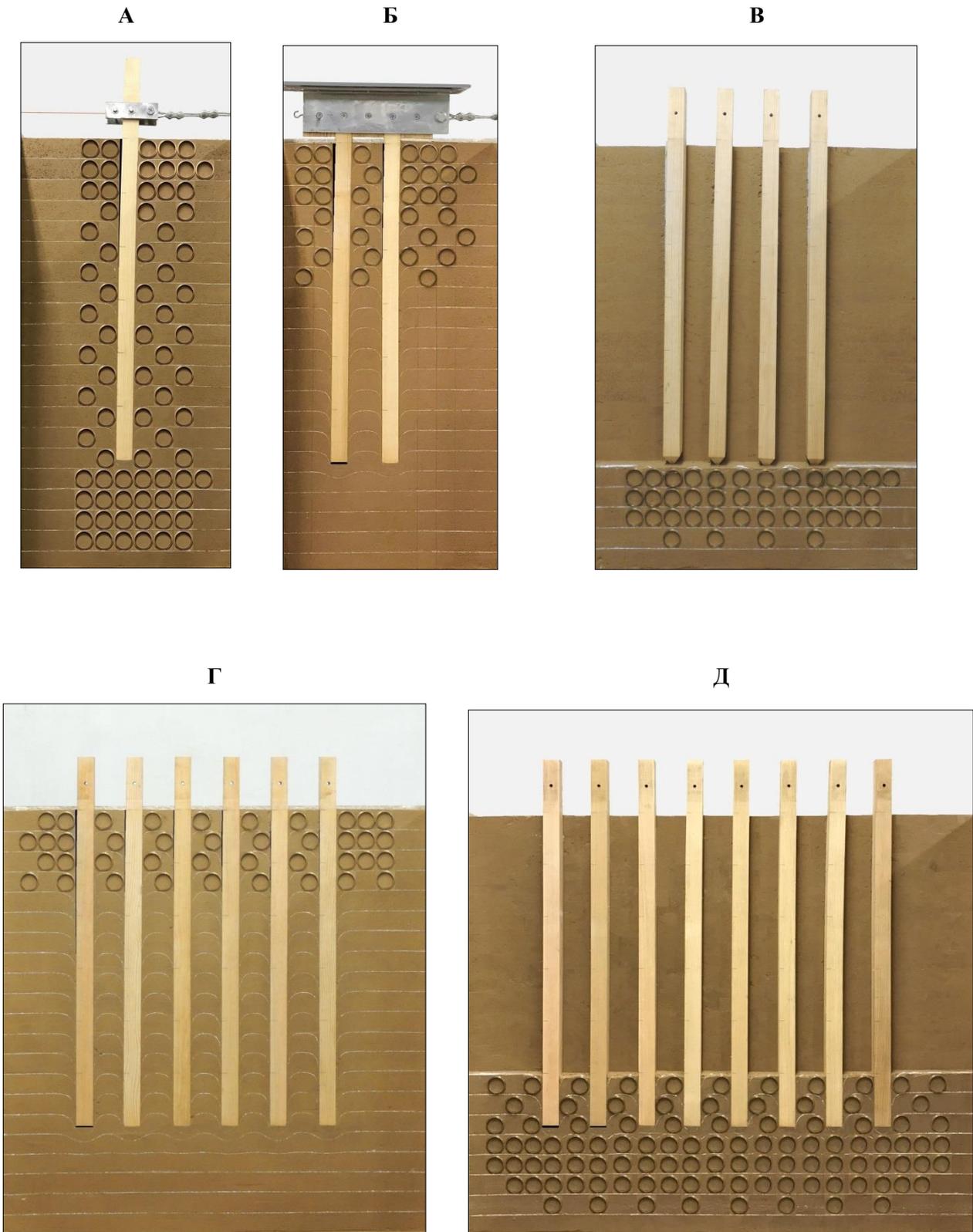


Рис. 8. Отбор образцов околосвайного грунта у боковой поверхности и под острием моделей свай: А – одиночная свая со свободной головой; Б – группа из 2 свай; B – свайно-грунтовая диафрагма из 4 свай; Г – свайно-грунтовая диафрагма из 6 свай; Д – свайно-грунтовая диафрагма из 8 свай

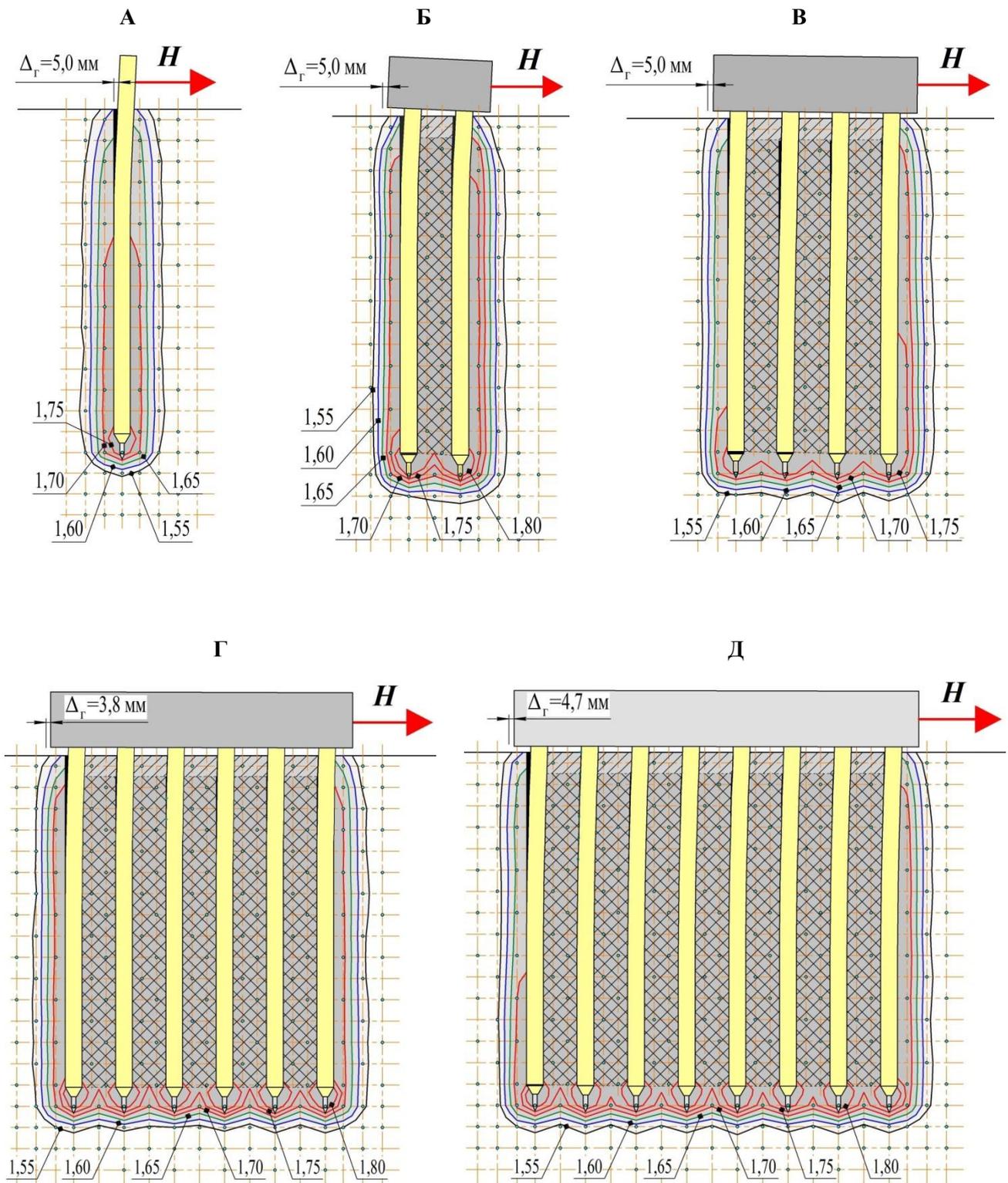


Рис. 9. Изолинии плотности сухого грунта ρ_d , г/см³: А – одиночная свая со свободной головой; Б – группа из 2 свай; В – свайно-грунтовая диафрагма из 4 свай; Г – свайно-грунтовая диафрагма из 6 свай; Д – свайно-грунтовая диафрагма из 8 свай



1. При погружении одиночной модели сваи грунт уплотняется в пределах околосвайного массива радиусом относительно вертикальной оси модели сваи равном $3d$, что соответствует результатам подобных исследований других специалистов.

2. Погружение в грунтовый массив последующих за первой моделей свай в ряду приводит к дополнительному уплотнению околосвайного грунта первой (лидирующей) сваи.

3. Область уплотнения околосвайного грунта приобретает цилиндрическую форму одинакового радиуса с глубины погружения свай, равной $3-3,5d$. Наименьшие и наибольшие значения плотности межсвайного грунта были определены в образцах соответственно у поверхности массива грунта и в уровне нижних концов свай. Уплотнение грунта под нижними концами моделей свай происходит на глубину $3d$ (табл. 2, рис. 4 и 5 цв. вклейки).

4. В результате погружения моделей свай: 1) плотность сухого грунта увеличивается от первоначального значения $\rho_d = 1,50 \text{ г/см}^3$ до значений, изменяющихся от $\rho_d = 1,62 \text{ г/см}^3$ до $\rho_d = 1,80 \text{ г/см}^3$ (табл. 2); 2) коэффициент пористости уменьшается с первоначальной величины $e = 0,807$ до значений, изменяющихся от $e = 0,748$ до $e = 0,457$ (табл. 3). Наибольшее уплотнение межсвайного и околосвайного грунтов происходит в уровне нижних концов свай.

5. В испытаниях горизонтальная нагрузка увеличивалась до величины, при которой происходило разрушение системы «свайный фундамент – грунтовое основание» с разуплотнением околосвайного грунта вокруг последней сваи в ряду, работающей на выдергивание.

Таблица 2

Плотность околосвайного и межсвайного грунта

| Тип фундамента | Плотность сухого грунта ρ_d , г/см ³ | | | |
|---------------------|--|-----------|-------------|----------------------|
| | околосвайного | | межсвайного | в уровне острия свай |
| | 0,5d–1,5d | 1,5d–3,0d | | |
| Одиночная свая | 1,55–1,71 | 1,50–1,57 | - | 1,55–1,79 |
| Группа из 2 свай | 1,55–1,77 | 1,50–1,70 | 1,61–1,80 | 1,55–1,83 |
| Диафрагма из 4 свай | 1,55–1,76 | 1,50–1,69 | 1,62–1,79 | 1,55–1,82 |
| Диафрагма из 6 свай | 1,55–1,72 | 1,50–1,64 | 1,63–1,77 | 1,55–1,86 |
| Диафрагма из 8 свай | 1,55–1,74 | 1,50–1,68 | 1,64–1,78 | 1,55–1,85 |



Таблица 3

Коэффициент пористости околосвайного и межсвайного грунта

| Тип фундамента | Коэффициент пористости грунта e , д. ед. | | | |
|---------------------|--|-------------|-------------|----------------------|
| | околосвайного | | межсвайного | в уровне острия свай |
| | $0,5d-1,5d$ | $1,5d-3,0d$ | | |
| Одиночная свая | 0,585–0,748 | 0,726–0,807 | - | 0,514–0,748 |
| Группа из 2 свай | 0,531–0,748 | 0,594–0,807 | 0,506–0,683 | 0,481–0,748 |
| Диафрагма из 4 свай | 0,540–0,748 | 0,604–0,807 | 0,514–0,673 | 0,489–0,748 |
| Диафрагма из 6 свай | 0,576–0,748 | 0,652–0,807 | 0,531–0,663 | 0,457–0,748 |
| Диафрагма из 8 свай | 0,558–0,748 | 0,613–0,807 | 0,522–0,652 | 0,465–0,748 |

В результате выполненных экспериментов было установлено, что работа свайно-грунтовых диафрагм под действием горизонтальных нагрузок представляет собой весьма сложное взаимодействие свай, околосвайного и межсвайного грунта, зависящее как от типа грунта, так и конструктивных особенностей фундамента: типа ростверка, количества, длины и шага свай в диафрагме, строгое математическое описание которого представляет собой сложную задачу. Поэтому для исследования и оценки несущей способности свайных фундаментов при действии на них горизонтальных нагрузок целесообразно использовать компьютерное моделирование.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Труды к VIII Международному конгрессу по механике грунтов и фундаментостроению / под редакцией Н. А. Цытовича ; Научно-исследовательский институт оснований и подземных сооружений Госстроя СССР, 6-12 августа 1973 г. – Москва : Стройиздат, 1973. – 423 с. : ил. – Текст : непосредственный.
2. Григорьев, Ю. С. Моделирование работы свайных фундаментов в лабораторных условиях / Ю. С. Григорьев, В. В. Фатеев. – Текст : непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2021. – № 2 (58). – С. 46–53.
3. Григорьев, Ю. С. Экспериментальная установка для испытаний моделей горизонтально нагруженных свайных фундаментов / Ю. С. Григорьев, В. В. Фатеев. – Текст : непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2021. – № 3 (59). – С. 56–61.
4. Григорьев, Ю. С. О методике испытаний моделей призматических свай в массиве глинистого грунта вертикальными нагрузками в лабораторных условиях / Ю. С. Григорьев, В. В. Фатеев. – Текст : непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2023. – № 4 (59). – С. 36–41.
5. Григорьев, Ю. С. Моделирование работы свайных фундаментов в лабораторных и в полевых условиях / Ю. С. Григорьев, В. В. Фатеев ; Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород : ННГАСУ, 2023. – 150 с. – ISBN 978-5-528-00539-3. – Текст : непосредственный.



6. Дубровщенко, Г. А. Моделирование работы буронабивных свай с использованием аффинного и приближенного подобия / Г. А. Дубровщенко. – Текст : непосредственный // Исследования по основаниям, фундаментам и механике грунтов. – Киев : Будивильник, 1969. – С. 95–100.

7. Знаменский, В. В. Инженерный метод расчета горизонтально нагруженных групп свай : учебное пособие для вузов / В. В. Знаменский. – Москва : АСВ, 2000. – 128 с. : ил. – Текст : непосредственный.

8. Григорьев, Ю. С. Экспериментальные исследования работы горизонтально нагруженных моделей свайно-грунтовых диафрагм в массиве глинистого грунта / Ю. С. Григорьев, В. В. Фатеев. – Текст : непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2024. – № 2 (70). – С. 38–44.

GRIGOREV Yuriy Semyonovich, candidate of technical sciences, professor of the chair of architecture; FATEEV Valeriy Valerevich, senior teacher of the chair of architecture

STUDIES OF DEFORMATION AND DESTRUCTION OF INTER-PILE AND NEAR-PILE SOIL IN HORIZONTALLY LOADED MODELS OF PILE-GROUND DIAPHRAGMS

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering
65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia. Tel.: +7 (831) 430-19-57;
e-mail: yus-gri@rambler.ru, valeriy-fateev@rambler.ru

Key words: clay soil, model of a soil massif, model of a pile-soil diaphragm, horizontal loads, deformations, destruction.

The article presents the results of research on the operation of horizontally loaded models of pile-ground diaphragms in an array of clay soil. The results are presented in the form of cartograms and photographic showing the location of cracks both on the surface and at different depths within the failing soil mass, as well as in the form of density isolines of inter-pile soil and near-pile soil mass.

REFERENCES

1. Trudy k VIII mezhdunarodnomu kongressu po mekhanike gruntov i fundamentostroeniyu [Proceedings of the VIII International Congress on Soil Mechanics and Foundation Engineering]. pod red. N. A. Tsytovicha; Nauchno-issledovatel'skiy institut osnovaniy i podzemnykh sooruzheniy Gosstroya – Moscow: Stroyizdat, 1973. – 423 p. : il.

2. Grigorev Yu. S., Fateev V. V. Modelirovanie raboty svaynykh fundamentov v laboratornykh usloviyakh [Modeling of pile foundations in laboratory conditions] / Privolzhsky nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegor. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod. 2021. № 2(58). P. 46–53.

3. Grigorev Yu. S., Fateev V. V. Eksperimentalnaya ustanovka dlya ispytaniy modeley gorizontally nagruzhennykh svaynykh fundamentov [Experimental installation for testing models of horizontally loaded pile foundations] / Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegor. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod, 2021. № 3(59). P. 56–61.

4. Grigorev, Yu. S. O metodike ispytaniy modeley prizmaticheskikh svay v massive glinistogo grunta vertikalnymi nagruzkami v laboratornykh usloviyakh [On the methodology of testing models of prismatic piles in an array of clay soil by vertical loads in laboratory



conditions] / Privolzhskiy nauchnyi zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegor. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. – Nizhny Novgorod, 2023. – № 4 (59). P. 36–41.

5. Grigorev, Yu. S. Modelirovanie raboty svainykh fundamentov v laboratornykh i v polevykh usloviyakh [Modeling the operation of pile foundations in the laboratory and in the field]: Nizhegor. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod: NNGASU, 2023. – 150 p. – ISBN 978-5-528-00539-3.

6. Dubrovshchenko G. A. Modelirovanie raboty buronabivnykh svay s ispolzovaniem affinnogo i priblizhennogo podobiya [Modeling the operation of bored piles using affine and approximate similarity]. Issledovaniya po osnovaniyam, fundamentam i mekhanike gruntov [Research on foundations, foundations and soil mechanics]. Kiev, Budivilnik, 1969. P. 95–100.

7. Znamenskiy V. V. Inzhenerny metod rascheta gorizontally nagruzhennykh grupp svay [Engineering method for calculating horizontally loaded groups of piles]. Uchebnoe posobie dlya vuzov. – Moscow, Izd-vo ASV, 2000. – 128 p., il.

8. Grigorev Yu. S., Fateev V. V. Eksperimentalnye issledovaniya raboty gorizontally nagruzhennykh modelei svaino-gruntovykh diafragm v massive glinistogo grunta [Experimental studies of the operation of horizontally loaded models of pile-ground diaphragms in an array of clay soil] / Privolzhskiy nauchny zhurnal / [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegor. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod, 2024. № 2 (70). P. 38-44.

© Ю. С. Григорьев, В. В. Фатеев, 2024

Получено: 20.06.2024 г.