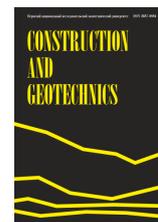




CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 15, № 2, 2024

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2024.2.02

УДК 624.154

УСИЛЕНИЕ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ КОНТУРНЫМ АРМИРОВАНИЕМ ТВЕРДЫМИ ИНЪЕКЦИОННЫМИ ТЕЛАМИ

М.Л. Нуждин¹, А.Б. Пономарев^{2,3}

¹Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет,
Новосибирск, Российская Федерация

²Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация

³Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 29 января 2024
Одобрена: 17 апреля 2024
Принята к публикации:
03 июня 2024

Ключевые слова:

армирование грунтового основания, контурное армирование, усиление свайных фундаментов, адаптивный метод.

АННОТАЦИЯ

Рассмотрен способ усиления свайных фундаментов контурным армированием. Армозементами служат твердые инъекционные тела, сформированные пакетным высоконапорным инъецированием. Для определения эффективности разных схем контурного армирования выполнены численные расчеты напряженно-деформированного состояния грунтового основания в программном комплексе MIDAS GTS NX 2019 (v1.1).

Рассмотрено несколько схем усиления: прерывистое и сплошное контурное армирование вдоль двух противоположных сторон и вдоль всего периметра ростверка. Для каждого случая рассчитывались варианты с восемью, шестью, четырьмя и двумя уровнями армирования на глубину l , $0,75l$, $0,5l$ и $0,25l$ от подошвы ростверка, где l – длина сваи.

Сделан вывод, что любая схема контурного армирования положительно влияет на напряженно-деформированное состояние основания, при этом удельная эффективность усиления снижается вместе с увеличением количества армоземента.

Удельная эффективность оценивалась по коэффициенту приведенного расхода материала $K_{\text{ПРМ}}$, равному отношению используемого объема твердых тел в кубических метрах к разности осадок фундамента после усиления и до него, выраженной в сантиметрах – т.е. требуемому объему армоземента в метрах кубических для снижения осадки фундамента на 1 см.

Рекомендовано усиление свайных фундаментов выполнять поэтапно – увеличивая количество армоземента: от прерывистого контурного армирования к сплошному; от армирования вдоль двух противоположных сторон к армированию вдоль всего периметра ростверка. При этом необходимость проведения последующих работ должна определяться по результатам мониторинга за развитием деформаций в процессе и после завершения работ каждого этапа.

© Нуждин Матвей Леонидович – кандидат технических наук, e-mail: 89139059520@mail.ru.

Пономарев Андрей Будимирович – доктор технических наук, профессор, e-mail: andreypab@mail.ru.

Matvey L. Nuzhdin – Ph. D. in Technical Sciences, e-mail: 89139059520@mail.ru.

Andrey B. Ponomaryov – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: andreypab@mail.ru.



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

STRENGTHENING OF PILE FOUNDATIONS BY CONTOUR REINFORCEMENT WITH HARD INJECTION BODIES

M.L. Nuzhdin¹, A.B. Ponomaryov^{2,3}

¹Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin),
Novosibirsk, Russian Federation

²Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

³Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 29 January 2024
Approved: 17 April 2024
Accepted for publication:
03 June 2024

Keywords:

soil foundation reinforcement,
contour reinforcement,
reinforcement of pile foundations,
group high-pressure injection,
adaptive method.

ABSTRACT

The article discusses a method of strengthening pile foundations with contour reinforcement. Armoelements are solid injection bodies formed by group high-pressure injection. To determine the effectiveness of various contour reinforcement schemes, the soil base stress-strain state numerical calculations were performed in the MIDAS GTS NX 2019 software package (v1.1).

Several reinforcement schemes are considered: continuous and intermittent contour reinforcement along the entire perimeter of the pile bush; continuous and intermittent contour reinforcement along two opposite sides of the pile bush. For each case, variants with 8-, 6-, 4- and 2 levels of reinforcement are calculated: to a depth of l from the sole of the grillage, $0.75l$, $0.5l$ and $0.25l$, where l is the length of the piles.

It is concluded that any contour reinforcement scheme has a positive effect on the stress-strain state of the base, while the specific reinforcement efficiency decreases along with an increase in the number of reinforcement elements.

The effectiveness of reinforcement is estimated by the coefficient of reduced material consumption K_{PRM} , equal to the ratio of the volume of solids used in cubic meters to the difference between the foundation sediment with and without reinforcement, expressed in centimeters – that is, the required volume of reinforcement elements in cubic meters to reduce the foundation sediment by 1 centimeter.

It is recommended to strengthen pile foundations in stages – increasing the number of reinforcement elements: from intermittent contour reinforcement to solid reinforcement or from reinforcement along two opposite sides to reinforcement along the entire perimeter of the grillage. At the same time, the need for subsequent work should be determined by the results of monitoring the development of deformations during and after the completion of each stage of work.

Введение

В строительной практике нередко требуется выполнить усиление свайных фундаментов, например, в случае увеличения нагрузки на основание или вследствие ухудшения грунтовых условий [1–4]. Результативный способ усиления – контурное армирование – внедрение твердых тел (армоэлементов) вдоль периметра ростверка [5–9]. Армоэлементы могут выполняться из различных материалов и иметь разную конструкцию [10–13], в том числе армоэлементами могут служить инъекционные тела, образованные нагнетанием подвижного цементно-песчаного раствора [14–16].

Эффективным методом нагнетания является технология пакетного высоконапорного инъецирования. Ее сущность заключается в одновременной подаче раствора через группу инъекторов в режиме гидроразрыва [17–20]. Нагнетание через несколько инъекторов, расположенных вдоль прямой линии, позволяет формировать в грунтовом массиве вертикально ориентированный диск условно прямоугольной формы [20]. Выполнение ряда инъекционных тел по контуру свайного куста создает подобие компрессионных условий и положительно влияет на изменение напряженно-деформированного состояния основания усиленного фундамента.

Для определения эффективности разных схем контурного армирования (прерывистого или сплошного; около двух противоположных сторон или вдоль всего периметра ростверка; на разную глубину: от 0,25*l* до *l*) были выполнены численные исследования в расчетном комплексе MIDAS.

Постановка задачи

Исследования напряженно-деформированного состояния грунтового основания, усиленного твердыми инъекционными телами – армоэлементами, сформированными пакетным высоконапорным инъецированием цементно-песчаного раствора, осуществлялись в программном комплексе MIDAS GTS NX 2019 (v1.1)¹.

Расчеты производились в пространственной постановке с учетом нелинейного характера работы грунта. Основание было представлено упругопластической моделью Мора – Кулона, элементы усиления, имеющие существенно большую жесткость, – линейно-упругой моделью.

Были приняты следующие параметры граничных условий:

- свобода перемещений по контуру верхней границы;
- свобода перемещений во всех направлениях по нижней границе;
- ограничение перемещений по вертикальным граням в горизонтальном направлении.

Расчетная схема в MIDAS строилась из сетки гексаэдральных и тетраэдрических элементов, включающей 54 584 элемента, 29 416 узлов, 88 824 степени свободы, 85 448 уравнений. Габаритные размеры расчетной области были приняты 11,6 × 11,6 × 20,0 м (рис. 1).

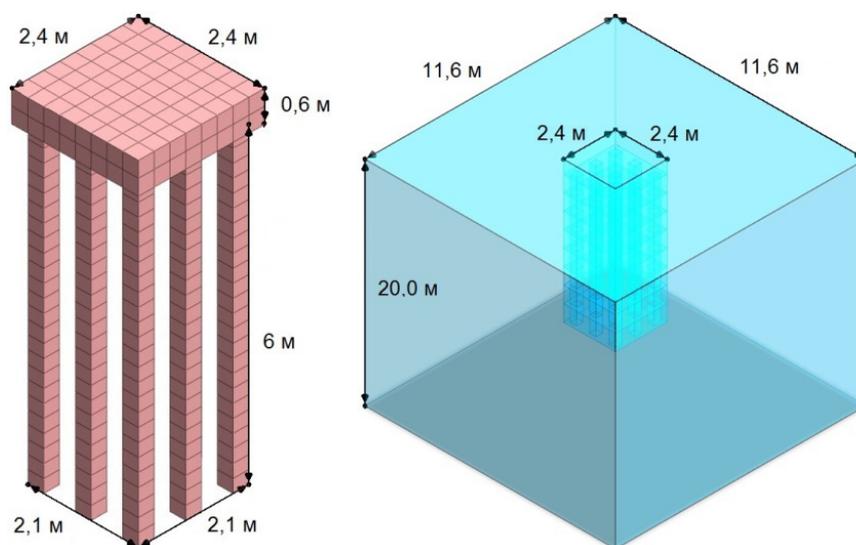


Рис. 1. Геометрическая схема свайного фундамента и расчетной области в программном комплексе MIDAS GTS NX 2019 (v1.1)

Fig. 1. Geometric scheme of the pile foundation and the calculation area in the MIDAS GTS NX 2019 (v1.1)

¹ Работы по численному моделированию выполнялись при поддержке сотрудников кафедры «Геотехника» Тюменского индустриального университета.

Было просчитано 16 схем усиления, расчеты выполнялись с учетом истории нагружения последовательно в три стадии:

- от собственного веса грунта;
- после устройства фундамента и элементов усиления;
- после приложения нагрузки.

В качестве примера был взят фундамент, состоящий из девяти свай сечением $0,3 \times 0,3$ м, длиной $l = 6,0$ м, расположенных по сетке $0,9 \times 0,9$ м, объединенных квадратным ростверком с размерами в плане $2,4 \times 2,4$ м и высотой $0,6$ м. Вертикальная нагрузка на фундамент $N = 5400$ кН, грунт основания – суглинок средней степени водонасыщения тугопластичный ($\rho = 1,95$ г/см³, $\varphi = 14^\circ$, $C = 15$ кПа, $E = 4,5$ МПа).

Указанные размеры и нагрузка типичны для фундаментов каркасных железобетонных зданий сельскохозяйственного и производственного назначения, подобные грунты широко распространены на юге Новосибирской области.

Физико-механические характеристики армозащитных элементов во всех расчетах были установлены следующими: $\gamma = 20$ кН/м³, $\nu = 0,2$, $E = 100$ МПа. Материал свай и свайного ростверка – бетон $\gamma = 24$ кН/м³, $E = 30 \times 10^3$ МПа.

Размеры элементов контурного армирования были приняты: длина $d = 0,50$ м, ширина $s = 0,20$ м, высота $h = 0,70$ м. Зазор между армозащитными элементами в плане – $0,075$ м, зазор по высоте – $0,05$ м, расстояние от ряда армозащитных элементов до края ростверка – $0,25$ м.

Рассматривались следующие схемы армирования:

- сплошное и прерывистое контурное армирование (по пять и три столбца около каждой стороны) вдоль всего периметра ростверка;
- сплошное и прерывистое контурное армирование (по пять и три столбца) вдоль двух противоположных сторон ростверка.

Для каждой схемы рассчитывались варианты с восемью, шестью, четырьмя и двумя уровнями армирования на глубину l , $0,75l$, $0,5l$ и $0,25l$ от подошвы ростверка, где l – длина свай.

Эффективность усиления оценивалась по коэффициенту приведенного расхода материала $K_{ПРМ}$, равному отношению используемого объема твердых тел в кубических метрах к разности осадок фундамента после усиления и до него, выраженной в сантиметрах, т.е. коэффициент $K_{ПРМ}$ показывает объем армозащитных элементов в метрах кубических, требуемый для снижения осадки фундамента на 1 см.

Результаты расчетов и их анализ

Расчетом было определено, что осадка свайного фундамента на естественном основании составляет $S_e = 141$ мм, что соответствует фактическому значению осадки реального фундамента в этих грунтовых условиях.

Принятые схемы контурного армирования свайного фундамента и результаты расчетов осадки после усиления представлены в табл. 1.

В табл. 1 в обозначениях схем: первая цифра – суммарное количество столбцов, вторая – количество уровней армирования по глубине.

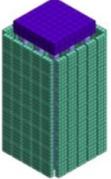
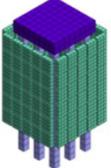
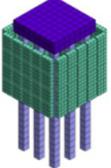
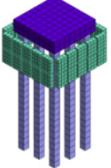
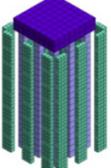
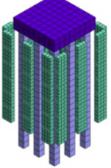
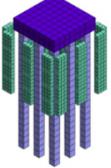
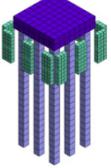
Анализируя результаты расчетов, можно сделать вывод о хорошей результативности усиления свайных фундаментов контурным армированием. Любой вариант армирования приводит к изменению напряженно-деформированного состояния грунтового основания и снижению уровня осадок.

Таблица 1

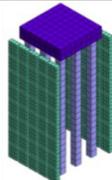
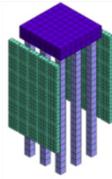
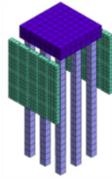
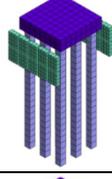
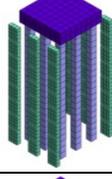
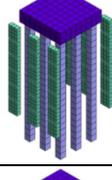
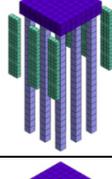
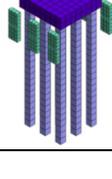
Схемы контурного армирования свайного фундамента и результаты расчетов

Table 1

Schemes of contour reinforcement of the pile foundation and calculation results

Номер схемы	Схема усиления	Шаг армирования	Глубина усиления	Объем элементов, м ³	Результат расчета
1	2	3	4	5	6
20 / 8		d	l	11,20	$S = 129 \text{ мм}$ $\Delta S = 12 \text{ мм}$ $\Delta S / S_e = 9 \%$ $K_{ГПМ} = 9,33$
20 / 6		d	$0,75l$	8,40	$S = 131 \text{ мм}$ $\Delta S = 10 \text{ мм}$ $\Delta S / S_e = 7 \%$ $K_{ГПМ} = 8,40$
20 / 4		d	$0,5l$	5,60	$S = 133 \text{ мм}$ $\Delta S = 8 \text{ мм}$ $\Delta S / S_e = 6 \%$ $K_{ГПМ} = 7,00$
20 / 2		d	$0,25l$	2,80	$S = 135 \text{ мм}$ $\Delta S = 6 \text{ мм}$ $\Delta S / S_e = 4 \%$ $K_{ГПМ} = 4,67$
12 / 8		$2d$	l	6,72	$S = 133 \text{ мм}$ $\Delta S = 8 \text{ мм}$ $\Delta S / S_e = 6 \%$ $K_{ГПМ} = 8,40$
12 / 6		$2d$	$0,75l$	5,04	$S = 134 \text{ мм}$ $\Delta S = 7 \text{ мм}$ $\Delta S / S_e = 5 \%$ $K_{ГПМ} = 7,20$
12 / 4		$2d$	$0,5l$	3,36	$S = 135 \text{ мм}$ $\Delta S = 6 \text{ мм}$ $\Delta S / S_e = 4 \%$ $K_{ГПМ} = 5,60$
12 / 2		$2d$	$0,25l$	1,68	$S = 137 \text{ мм}$ $\Delta S = 4 \text{ мм}$ $\Delta S / S_e = 3 \%$ $K_{ГПМ} = 4,20$

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6
10 / 8		d , вдоль двух противоположных сторон	l	5,60	$S = 135 \text{ мм}$ $\Delta S = 6 \text{ мм}$ $\Delta S / S_e = 4 \%$ $K_{ПРМ} = 9,33$
10 / 6		d , вдоль двух противоположных сторон	$0,75l$	4,20	$S = 136 \text{ мм}$ $\Delta S = 5 \text{ мм}$ $\Delta S / S_e = 4 \%$ $K_{ПРМ} = 8,40$
10 / 4		d , вдоль двух противоположных сторон	$0,5l$	2,80	$S = 137 \text{ мм}$ $\Delta S = 4 \text{ мм}$ $\Delta S / S_e = 3 \%$ $K_{ПРМ} = 7,00$
10 / 2		d , вдоль двух противоположных сторон	$0,25l$	1,40	$S = 138 \text{ мм}$ $\Delta S = 3 \text{ мм}$ $\Delta S / S_e = 2 \%$ $K_{ПРМ} = 4,67$
6 / 8		$2d$, вдоль двух противоположных сторон	l	3,36	$S = 137 \text{ мм}$ $\Delta S = 4 \text{ мм}$ $\Delta S / S_e = 3 \%$ $K_{ПРМ} = 8,40$
6 / 6		$2d$, вдоль двух противоположных сторон	$0,75l$	2,52	$S = 138 \text{ мм}$ $\Delta S = 3 \text{ мм}$ $\Delta S / S_e = 2 \%$ $K_{ПРМ} = 8,40$
6 / 4		$2d$, вдоль двух противоположных сторон	$0,5l$	1,68	$S = 138 \text{ мм}$ $\Delta S = 3 \text{ мм}$ $\Delta S / S_e = 2 \%$ $K_{ПРМ} = 5,60$
6 / 2		$2d$, вдоль двух противоположных сторон	$0,25l$	0,84	$S = 139 \text{ мм}$ $\Delta S = 2 \text{ мм}$ $\Delta S / S_e = 1 \%$ $K_{ПРМ} = 4,20$

Так, при усилении сплошным 8-уровневым контурным армированием в плане вдоль всего периметра ростверка (от подошвы до нижнего конца свай) по глубине (20 / 8) деформации снижаются на 12 мм, или на 9 %, относительно значения осадки свайного фундамента на естественном основании. В случае 6-уровневого армирования осадка снижается на 10 мм, или на 7 %, 4-уровневого – на 6 мм, или на 4 %. При прерывистом контурном армировании осадка меньше на 4...8 мм или на 3...6 %, в зависимости от количества слоев армоэлементов.

Сплошное контурное армирование вдоль двух противоположных сторон ростверка приводит к снижению деформаций на 3...6 мм или на 2...4 %, прерывистое – на 2...4 мм или на 1...3 % соответственно.

Коэффициенты приведенного расхода материала при контурном армировании свайного фундамента находятся в пределах $K_{ГРМ} = 4,20 \dots 9,33$. При этом схемы усиления прерывистым армированием, как вдоль всего периметра, так и вдоль двух противоположных сторон ростверка, более экономичны – при 8-уровневом армировании по глубине (12 / 8 и 6 / 8) $K_{ГРМ} = 8,40$; при сплошном контурном армировании (20 / 8 и 10 / 8) значение коэффициента приведенного расхода материала составляет $K_{ГРМ} = 9,33$.

Для всех схем размещения армозащитных элементов в плане коэффициент приведенного расхода материала растет с увеличением количества уровней армирования по глубине.

На рис. 2 показаны изолинии вертикальных напряжений и перемещений грунтового основания свайного фундамента, усиленного контурным армированием по характерным схемам.

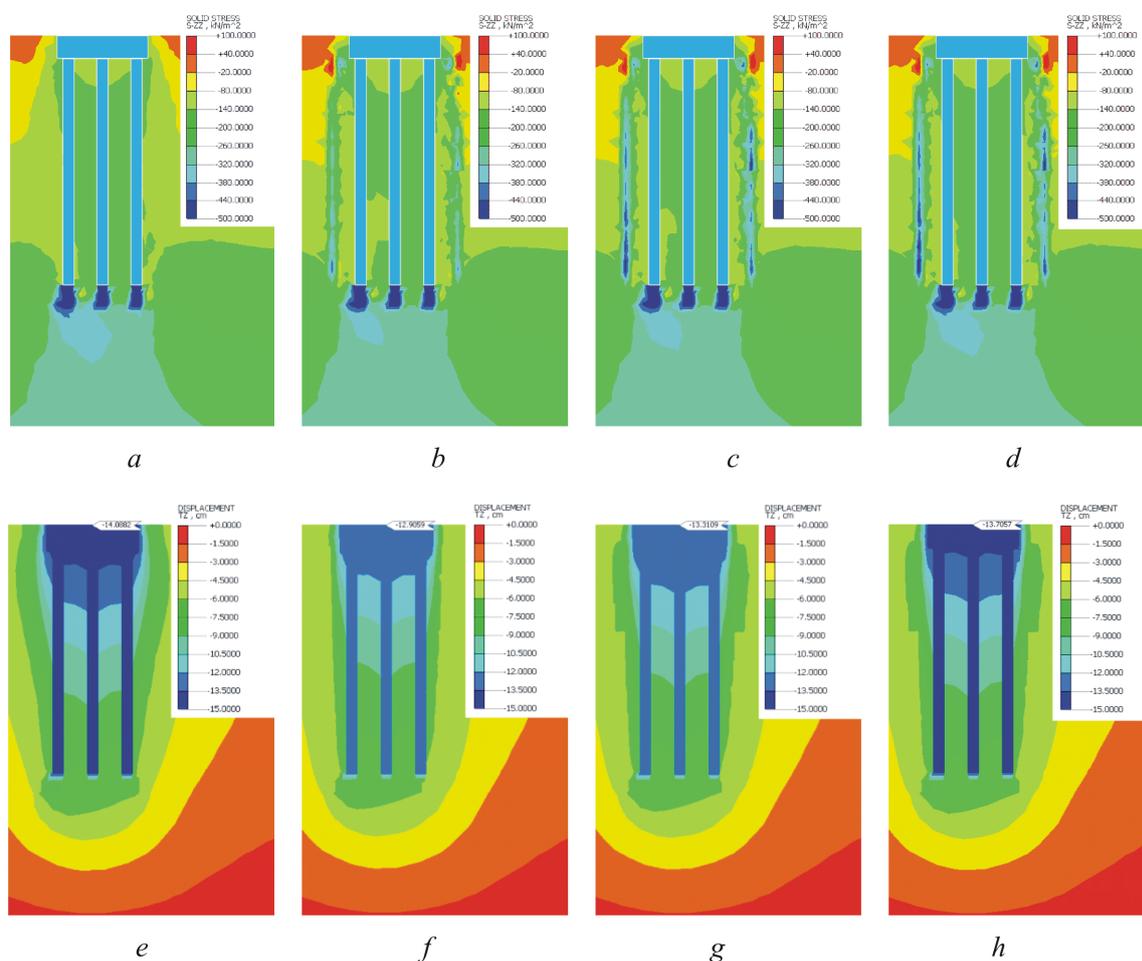


Рис. 2. Изолинии вертикальных напряжений (a, b, c, d) и перемещений (e, f, g, h) свайного фундамента: a, e – на не усиленном основании; b, f – на основании со сплошным контурным армированием (20 / 8) и c, g – на основании с прерывистым контурным армированием (16 / 8) 8-уровневым по глубине; d, h – с прерывистым контурным армированием вдоль двух противоположных сторон ростверка 8-уровневым по глубине (6 / 8)

Fig. 2. Isolines of vertical stresses (a, b, c, d) and displacements (e, f, g, h) of the pile foundation: a, e – on a non-reinforced base; b, f – on a base with solid contour reinforcement (20 / 8) and c, g – on a base with intermittent contour reinforcement (16 / 8) 8-level in depth; d, h – with intermittent contour reinforcement along the two opposite sides of the grillage 8-level in depth (6 / 8)

Обобщим полученные результаты. Деформации грунтового основания напрямую зависят от объема инъекционных тел – увеличение количества армоэлементов ведет к снижению осадок, однако даже минимальное армирование положительно сказывается на напряженно-деформированном состоянии грунтового массива. Важно, что при этом вместе с увеличением количества армоэлементов удельная эффективность снижается.

Как следствие, усиление пакетным высоконапорным инъецированием целесообразно выполнять поэтапно – увеличивая количество армоэлементов и соответственно меняя схему их расположения в плане (от прерывистого контурного армирования вдоль двух противоположных сторон к сплошному вдоль всего периметра).

Предлагается два варианта поэтапного усиления свайных фундаментов контурным армированием твердыми инъекционными телами.

Первый вариант содержит следующую последовательность (табл. 2):

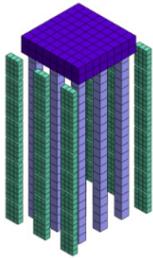
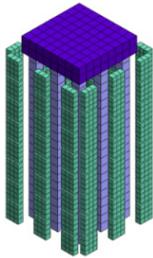
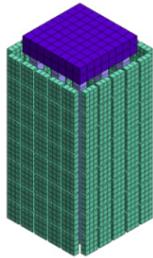
- 1-й этап: прерывистое контурное армирование вдоль двух противоположных сторон ростверка;
- 2-й этап: прерывистое контурное армирование вдоль всего периметра ростверка;
- 3-й этап: сплошное контурное армирование вдоль всего периметра ростверка.

Таблица 2

Последовательность усиления свайного куста контурным армированием (1-й вариант)

Table 2

The sequence of reinforcement of a pile bush by contour reinforcement (1st option)

1-й этап	2-й этап	3-й этап
		
$\Delta S / S_e = 3 \%$ $K_{ПРМ} = 8,40$	$\Delta S / S_e = 6 \%$ $K_{ПРМ} = 8,40$	$\Delta S / S_e = 9 \%$ $K_{ПРМ} = 9,33$

Второй вариант усиления (табл. 3):

- 1-й этап: прерывистое контурное армирование вдоль двух противоположных сторон ростверка;
- 2-й этап: сплошное контурное армирование вдоль двух противоположных сторон ростверка;
- 3-й этап: сплошное контурное армирование вдоль всего периметра ростверка.

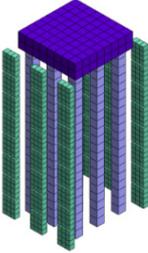
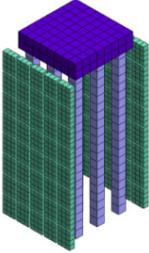
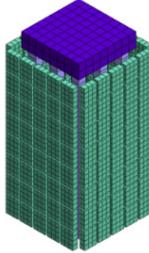
Разность осадок свайного фундамента после усиления и до него указывает на более высокую продуктивность первого варианта: $\Delta S / S_e$ на 2-й этапе составляет 6 % при $K_{ПРМ} = 8,40$, против 4 % при $K_{ПРМ} = 9,33$. Однако лабораторные эксперименты показывают, что сплошное армирование вдоль двух противоположных сторон ростверка эффективнее прерывистого вдоль всего периметра [5].

Таблица 3

Последовательность усиления свайного куста контурным армированием (2-й вариант)

Table 3

The sequence of reinforcement of a pile bush by contour reinforcement (2st option)

1-й этап	2-й этап	3-й этап
		
$\Delta S / S_e = 3 \%$ $K_{ГРМ} = 8,40$	$\Delta S / S_e = 4 \%$ $K_{ГРМ} = 9,33$	$\Delta S / S_e = 9 \%$ $K_{ГРМ} = 9,33$

На практике, очевидно, выбор варианта контурного армирования свайных фундаментов будет зависеть от возможности размещения инъекционного оборудования и других обстоятельств. Также принципиально возможен вариант поэтапного увеличения глубины армирования при постоянном количестве армоэлементов в плане.

Усиление ленточных свайных фундаментов может производиться в два этапа (табл. 4):

- 1-й этап: прерывистое контурное армирование вдоль ленточного свайного фундамента;
- 2-й этап: сплошное контурное армирование вдоль ленточного свайного фундамента.

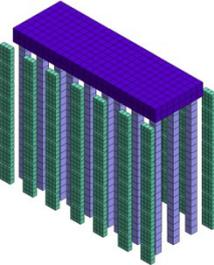
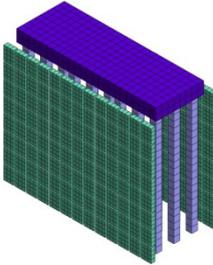
Контурное армирование относится к адаптивному методу усиления – необходимость проведения последующих работ определяется по результатам мониторинга за динамикой развития деформаций грунтового основания в процессе и после завершения каждого этапа.

Таблица 4

Последовательность усиления ленточного свайного фундамента контурным армированием

Table 4

The sequence of reinforcement of the tape pile foundation by contour reinforcement

1-й этап	2-й этап
	
$\Delta S / S_e \approx 6 \%$ $K_{ГРМ} = 8,40$	$\Delta S / S_e \approx 9 \%$ $K_{ГРМ} = 9,33$

Заключение

Выполненные исследования показывают, что любой вариант контурного армирования положительно влияет на напряженно-деформированное состояние основания, при этом удельная эффективность усиления снижается вместе с увеличением количества армоэлементов.

Усиление свайных фундаментов рекомендуется выполнять поэтапно – увеличивая количество армоэлементов: от прерывистого контурного армирования к сплошному или от армирования вдоль двух противоположных сторон к армированию вдоль всего периметра ростверка. При этом необходимость проведения последующих работ должна определяться по результатам мониторинга за развитием деформаций в процессе и после завершения работ каждого этапа.

Благодарности

Авторы статьи благодарят сотрудников кафедры «Геотехника» Тюменского индустриального университета кандидата технических наук, доцента Р.В. Мельникова и кандидата технических наук, доцента Д.В. Рачкова за ценные советы и рекомендации по выполнению расчетов в MIDAS GTS NX 2019 (v1.1).

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Библиографический список

1. Мангушев, Р.А. Устройство и реконструкция оснований и фундаментов на слабых и структурно-неустойчивых грунтах / Р.А. Мангушев, Р.А. Усманов, А.И. Осокин; под ред. Р.А. Мангушева. – СПб., 2018. – 496 с.
2. Власов, В.П. Способ усиления свайных фундаментов в зоне вечной мерзлоты / В.П. Власов, С.А. Гулый // Знание – на службу нуждам Севера: материалы 1-й Междунар. конф. Академии Северного форума Республики Саха (РФ). – Якутск, 1996. – С. 184.
3. Никифорова, Н.С. Несущая способность свай в многолетнемерзлых грунтах при изменении климата / Н.С. Никифорова, А.В. Коннов // Construction and Geotechnics. – 2021. – Т. 12, № 3. – С. 14–24. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.3.02
4. Взаимодействие системы усиления свайных фундаментов с предварительно опрессованным грунтовым основанием эксплуатируемого сооружения / Я.А. Пронозин, М.А. Степанов, А.Н. Шуваев, Д.Н. Давлатов // Construction and Geotechnics. – 2018. – Т. 9, № 3. – С. 42–53. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.3.05
5. Нуждин, М.Л. Экспериментальные исследования усиления грунтового основания свайных фундаментов армированием жесткими включениями / М.Л. Нуждин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2019. – Т. 10, № 3. – С. 5–15. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.3.01
6. Нуждин, Л.В. Армирование грунтов основания вертикальными стержнями / Л.В. Нуждин, А.А. Кузнецов // Труды международного семинара по механике грунтов, фундаментостроению и транспортным сооружениям. – М., 2000. – С. 204–206.

7. Армирование грунтового основания 16-этажного жилого дома жесткими вертикальными стержнями / Л.В. Нуждин, В.П. Писаненко, П.А. Гензе, А.А. Кузнецов, А.М. Караулов, М.Л. Нуждин, В.А. Ступников // Известия вузов. Строительство. – 2002. – № 3. – С. 141–146.
8. Мирсаяпов, И.Т. Напряженно-деформированное состояние грунтового основания, армированного вертикальными и горизонтальными элементами / И.Т. Мирсаяпов, Р.А. Шарафутдинов // Известия КГАСУ. – 2017. – № 1 (39). – С. 153–158.
9. Мельников, Р.В. Численное определение областей грунта для исправления крена здания / Р.В. Мельников, Я.А. Пронозин, А.А. Тарасенко // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 4 (59). – С. 108–117. DOI: 10.52170/1815-9265_2021_59_108
10. Пономарев, А.Б. Анализ и проблемы исследований геосинтетических материалов в России / А.Б. Пономарев, В.Г. Офрихтер // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2013. – № 2. – С. 68–73.
11. Ramya, M. Behaviourial study on geopolymer column soil / M. Ramya, S. Jeyapriya // Ground Improvement Techniques and Geosynthetics. – IGS 2016. – Singapore, 2019. – Vol. 2. – P. 1–9.
12. Kumar, P. Bearing capacity of strip footing on clay soil reinforced with metal strips and with anchors / P. Kumar // Ground Improvement Techniques and Geosynthetics. – IGS 2016. – Singapore, Springer, 2019. – Vol.2 – P. 77–84.
13. Croce, P. Jet Grouting. Technology, design and control / P. Croce, A. Flora, G. Modoni. – London, 2014. – 284 p.
14. Филимонов, С.Д. Опыт использования метода цементации в режиме гидроразрыва на объектах фирмы «Геомассив» / С.Д. Филимонов // Труды VI Петрухинских чтений. – М., 2022. – С. 37–43. DOI: 10.37538/2713-1149-2022-37-43
15. Шапошников, А.В. Выравнивание фундаментов зданий методом инъекции растворов на основе цемента / А.В. Шапошников, В.В. Семкин, М.Н. Ибрагимов // Труды VI Петрухинских чтений. – М., 2022. – С. 75–86. DOI: 10.37538/2713-1149-2022-75-86
16. Шулятьев, О.А. Применение гидроразрывной технологии в практике строительства / О.А. Шулятьев // Труды VI Петрухинских чтений. – М., 2022. – С. 7–22. DOI: 10.37538/2713-1149-2022-7-22
17. Nuzhdin, M.L. Experimental studies on model pile foundations reinforced by hard inclusions / M.L. Nuzhdin, L.V. Nuzhdin, A.B. Ponomaryov // Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development: Lecture Notes in Civil Engineering. – Singapore, 2019. – Vol. 62. – P. 193–197. DOI: 10.1007/978-981-15-2184-3_24
18. Попсуенко, И.К. Подъем фундаментов нагнетанием в их основания цементных растворов и расширяющихся геополимеров / И.К. Попсуенко, А.С. Борисов, П.П. Дегтярев // Труды VI Петрухинских чтений. – М., 2022. – С. 87–112. DOI: 10.37538/2713-1149-2022-87-112
19. A field experimental study on the diffusion behavior of expanding polymer grouting material in soil / Ch. Guo, B. Sun, F. Wang, M. Shi, X. Li // Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 2019. – № 56. – P. 171–177. DOI: 10.1007/s11204-019-09586-7
20. Нуждин, М.Л. Экспериментальное подтверждение возможности создания в грунтовом массиве инъекционных тел установленной формы / М.Л. Нуждин, Л.В. Нуждин // Известия вузов. Строительство. – 2019. – № 10. – С. 101–112. DOI: 10.32683/0536-1052-2019-730-10-101-112

References

1. Mangushev R.A., Usmanov R.A., Osokin A.I. Ustrojstvo i rekonstrukciya osnovanij i fundamentov na slabyx i strukturno-neustojchivyx gruntax [Construction and reconstruction of foundations and foundations on weak and structurally unstable soils]. Ed. R.A. Mangushev. Sainp Petersburg, 2018, 496 p.
2. Vlasov V.P., Guly`j S.A. Sposob usileniya svajnyx fundamentov v zone vечноj merzloty [Method of strengthening pile foundations in the permafrost zone]. *Znanie – na sluzhbu nuzhdam Severa: materialy 1-j mezhdunarodnoj konferencii Akademii Severnogo foruma Respubliki Saxa (RF)*. Yakutsk, 1996, p. 184.
3. Nikiforova N.S., Konnov A.V. Nesushhaya sposobnost` svaj v mnogoletnemerzlyx gruntax pri izmenenii klimata [Bearing capacity of piles in permafrost soils under climate change]. *Construction and Geotechnics*, 2021, vol. 12, iss. 3, pp. 14-24. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.3.02.
4. Pronozin Ya.A., Stepanov M.A., Shuvaev A.N., Davlatov D.N. Vzaimodejstvie sistemy usileniya svajnyx fundamentov s predvaritel`no opressovannym gruntovym osnovaniem ekspluatiruемого sooruzheniya [Interaction of the pile foundation reinforcement system with the pre-pressed soil base of the operated structure]. *Construction and Geotechnics*, 2018, vol. 9, iss. 3, pp. 42-53. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.3.05.
5. Nuzhdin M.L. Jeksperimental'nye issledovaniya usileniya gruntovogo osnovaniya svajnyx fundamentov armirovaniem zhestkimi vkljuchenijami [Experimental studies of strengthening the soil base of pile foundations by reinforcing with rigid inclusions]. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura*, 2019, vol. 10, iss. 3, pp. 5-15. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.3.01.
6. Nuzhdin L.V., Kuznecov A.A. Armirovanie gruntov osnovaniya vertikal'nymi sterzhnjami [Reinforcement of foundation soils with vertical rods]. *Trudy mezhdunarodnogo seminaru po mehanike gruntov, fundamentostroeniju i transportnym sooruzhenijam*. Moscow, 2000, pp. 204-206.
7. Nuzhdin L.V., Pisanenko V.P., Genze P.A., Kuznetsov A.A., Karaulov A.M., Nuzhdin M.L., Stupnikov V.A. Armirovanie gruntovogo osnovaniya 16-ti jetazhnogo zhilogo doma zhestkimi vertikal'nymi sterzhnjami [Reinforcement of the soil base of a 16-storey residential building with rigid vertical rods]. *Izvestija vuzov. Stroitel'stvo*, 2002, no. 3, pp. 141-146.
8. Mirsajapov I.T., Sharafutdinov R.A. Naprjazhenno-deformirovanoe sostojanie gruntovogo osnovaniya, armirovannogo vertikal'nymi i gorizontalnymi jelementami [Stress-strain state of a soil base reinforced with vertical and horizontal elements]. *Izvestija KGASU*, 2017, no. 1 (39), pp. 153-158.
9. Mel'nikov R.V., Pronozin Ja.A., Tarasenko A.A. Chislennoe opredelenie oblastej grunta dlja ispravlenija krena zdaniya [Numerical determination of ground areas to correct building roll]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija*, 2021, no. 4 (59), pp. 108-117. DOI: 10.52170/1815-9265_2021_59_108.
10. Ponomarev A.B., Ofrihter V.G. Analiz i problemy issledovanij geosinteticheskikh materialov v Rossii [Analysis and problems of geosynthetic materials research in Russia]. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura*, 2013, no. 2, pp. 68-73.
11. Ramya M., Jeyapriya S. Behaviourial study on geopolymer column soil. *Ground Improvement Techniques and Geosynthetics. IGS 2016*. Singapore, 2019, vol. 2, pp. 1-9.

12. Kumar P. Bearing capacity of strip footing on clay soil reinforced with metal strips and with anchors. *Ground Improvement Techniques and Geosynthetics*, IGS, 2016. Singapore, 2019, vol. 2, pp. 77-84.
13. Croce P., Flora A., Modoni G. Jet Grouting. Technology, design and control. London, 2014, 284 p.
14. Filimonov S.D. Opyt ispol'zovaniya metoda cementacii v rezhime gidrorazryva na ob'ektah firmy «Geomassiv» [The experience of using the method of cementation in the mode of hydraulic fracturing at the facilities of the company "Geomassiv"]. *Trudy VI Petruhinskih chtenij*. Moscow, 2022, pp. 37-43. DOI: 10.37538/2713-1149-2022-37-43.
15. Shaposhnikov A.V., Semkin V.V., Ibragimov M.N. Vyravnivanie fundamentov zdanij metodom in'ekcii rastvorov na osnove cementa [Leveling of building foundations by injection of cement-based solutions]. *Trudy VI Petruhinskih chtenij*. Moscow, 2022, pp. 75-86. DOI: 10.37538/2713-1149-2022-75-86.
16. Shulyat'ev O.A. Primenenie gidrorazryvnoj tekhnologii v praktike stroitel'stva [Application of hydraulic fracturing technology in construction practice]. *Trudy VI Petruhinskih chtenij*. Moscow, 2022, pp. 7-22. DOI: 10.37538/2713-1149-2022-7-22.
17. Nuzhdin M.L., Nuzhdin L.V., Ponomaryov A.B. Experimental studies on model pile foundations reinforced by hard inclusions. *Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development: Lecture Notes in Civil Engineering*, Singapore, 2019, vol. 62, pp. 193-197. DOI: 10.1007/978-981-15-2184-3_24.
18. Popsuenko I.K., Borisov A.S., Degtyarev P.P. Pod'em fundamentov nagnetaniem v ih osnovaniya cementnyh rastvorov i rasshiryayushchihsya geopolimerov [Lifting of foundations by injection of cement mortars and expanding geopolymers into their bases]. *Trudy VI Petruhinskih chtenij*. Moscow, 2022, pp. 87-112. DOI: 10.37538/2713-1149-2022-87-112.
19. Guo Ch., Sun B., Wang F., Shi M., Li X. A field experimental study on the diffusion behavior of expanding polymer grouting material in soil. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2019, no. 56, pp. 171-177. DOI: 10.1007/s11204-019-09586-7.
20. Nuzhdin M.L., Nuzhdin L.V. Jeksperimental'noe podtverzhdenie vozmozhnosti sozdaniya v gruntovom massive inekcionnyh tel ustanovlennoj formy [Experimental confirmation of the possibility of creating injection bodies of the established shape in the soil mass]. *Izvestija vuzov. Stroitel'stvo*, 2019, no. 10, pp. 101-112. DOI: 10.32683/0536-1052-2019-730-10-101-112.