

УДК 624.154

ПОГРУЖЕНИЕ, РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МОНОЛИТНОЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ СВАИ КОНИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Кужахметова Э.Р.*Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, e-mail: elja_09@bk.ru*

В статье представлена конструкция монолитной железобетонной сваи конической формы с нижним щебневым расширением шарообразной формы, обеспечивающая при горизонтальных и вертикальных нагрузках большую несущую способность в грунте за счет своей формы. Целью данной работы является расчетное сравнение предлагаемой сваи со сваями других форм, обосновывающее возможность применения висячей сваи конической формы в виде сваи – стойки путем устройства послойного щебневого расширения на конце и вокруг сваи. Подобное конструктивно – технологическое решение приводит к снижению стоимости фундамента. Кроме этого в случае реконструкции здания данный способ оказывается наиболее эффективным, поскольку послойная забивка щебня в основание будущей бурунабивной сваи обеспечит, как показывает расчетный анализ, существенное уменьшение ее осадки. Расчеты свай выполнены с применением пространственных (3–D) конечноэлементных моделей в программном комплексе FEMAP / NX NASTRAN.

Ключевые слова: свая, прочностной расчет свай, деформационный расчет свай, метод конечных элементов, монолитная железобетонная свая конической формы, свая в форме конуса, послойная забивка щебня, щебеночная оболочка

DIPPING, CALCULATION AND CONSTRUCTION OF THE MONOLITHIC REINFORCED CONCRETE PILE OF THE CONICAL FORM

Kuzhakhmetova E.R.*Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, e-mail: elja_09@bk.ru*

The article presents the construction of a monolithic reinforced concrete pile of conical shape with lower ballast expansion of the spherical shape, which provides a high load-carrying capacity in the ground for horizontal and vertical loads due to its shape. The aim of this paper is a computational comparison of the proposed pile with piles of other shapes, which justifies the possibility of using a pendant pile conical in the form of a pile – rack by means of a layer – by – layer detrital expansion at the end and around the pile. Such a constructive technological solution leads to a decrease in the cost of the foundation. In addition, in the case of the reconstruction of the building, this method proves to be the most effective, since layerwise driving of crushed stone into the base of the future bored pile will provide, as shown in the calculation analysis, a significant reduction in its draft. Pile calculations are performed using spatial (3–D) finite element models in the FEMAP / NX NASTRAN software package.

Keywords: pile, strength calculation of piles, deformation calculation of piles, finite element method, monolithic reinforced concrete pile of conical shape, pile in the form of a cone, layer-by-layer driving of crushed stone, crushed stone

Монолитная железобетонная свая конической формы [1] находит применение в строительстве зданий и сооружений различного назначения. По способу заглубления в грунт свая конической формы является бурунабивной. Подобная технология называется особенно удобной и безопасной при возведении зданий (сооружений) вблизи существующих. Использование свай конической формы при реконструкции зданий, является не только экономически эффективным, но и незаменимым, поскольку забивка сваи обычной формы на глубину сваи существующего здания может оказаться опасной для самого здания.

Погружение

Выполнение монолитной железобетонной сваи конической формы осуществляется в следующей последовательности. Сначала пробуривается вертикальная скважина цилиндрической формы на всю длину сваи, т.е. до проектной отметки. Затем на дно сква-

жины периодически подсыпается щебень небольшими порциями. Путем послойной забивки щебня до отказа в нижнем конце сваи создается шарообразное щебневое расширение. В образовавшуюся цилиндрическую скважину с нижним щебневым расширением вставляется раскатчик. Дальнейшая подсыпка щебня в скважину продолжается небольшими частями. С помощью круговых движений раскатчика щебень вдавливается в грунт, уплотняя его. Таким образом, образуется скважина конической формы, стенки которой образованы уплотненным грунтом и щебнем. В утрамбованную таким образом щебневую оболочку устанавливается пространственный арматурный каркас в форме конуса, состоящий из вертикально-продольных стержней, диаметр которых определяется расчетным путем. Стержни соединяются между собой горизонтальными хомутами, шаг и диаметр, которых устанавливается по конструктивным требованиям нормативных источников.

Вертикальное положение арматурного каркаса сваи обеспечивается за счет крепежных элементов, изготовленных в виде двух пересеченных стержней и установленных внутри каркаса с шагом в $1/3$ длины сваи по высоте. Дополнительные стержни креплений выступают из каркаса на величину $0,05\text{--}0,07$ м, согласно существующим конструктивным требованиям. После установки арматурного каркаса в скважину подается бетонная смесь с последующим вибрированием (рис. 1).

бень любой фракции согласно ГОСТ 8267. Для расчета принят щебень группы «А» с размерами $(40\text{--}70) \cdot 10^{-2}$ мм с модулем упругости $E = 350$ МПа (табл. 3.2 [3]) и коэффициентом Пуассона $\nu = 0,3$. Толщина щебня вокруг железобетонной сваи составляет $0,1$ м. Таким образом, верхний диаметр щебневой оболочки D составит $0,8$ м, а нижний диаметр $d = 0,5$ м. Диаметр нижнего щебневого шарообразного уширения на конце сваи составляет приблизительно $1,0$ м. Следовательно, общая длина набивной сваи кони-

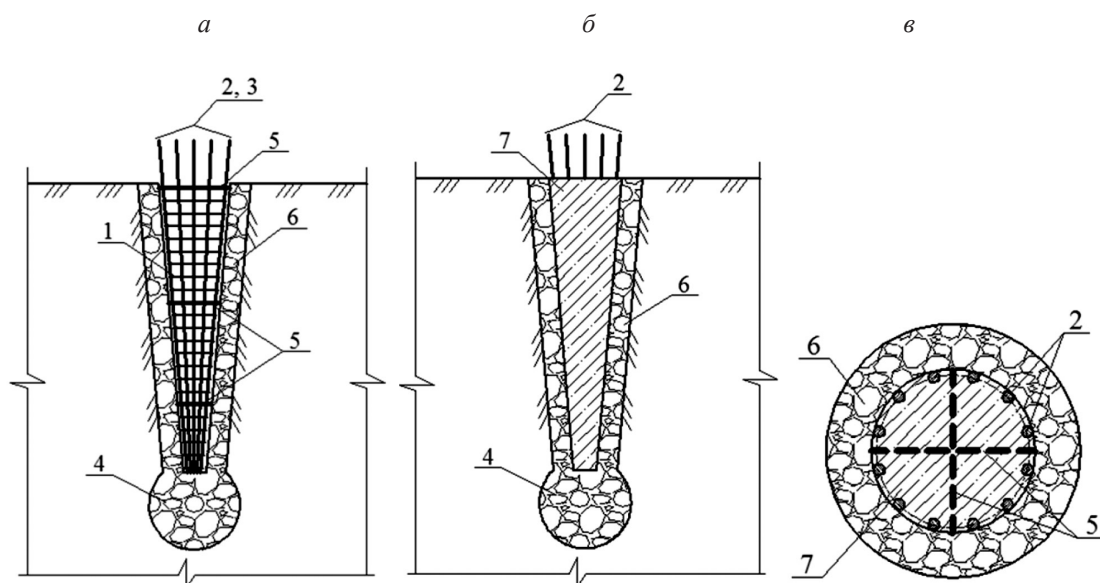


Рис. 1. Монолитная железобетонная свая конической формы:

а – вид сваи в разрезе; *б* – общий вид сваи; *в* – вид сваи в плане:

1 – пространственный арматурный каркас, выполненный в форме конуса; *2* – продольные арматурные стержни периодического профиля; *3* – поперечные стержни (хомуты); *4* – щебневое расширение округлой формы; *5* – дополнительный крепеж в виде стержней; *6* – утрамбованная щебневая оболочка; *7* – бетонный наполнитель

Расчет и конструирование

Для расчетного исследования монолитной железобетонной сваи конической формы приняты следующие исходные данные: верхний диаметр сваи $D_{\text{св}} = 0,6$ м, нижний диаметр $d_{\text{св}} = 0,3$ м, длина железобетонной сваи $L = 2,0$ м. Материал сваи – тяжелый бетон класса В15, с модулем упругости $E_b = 24 \cdot 10^3$ МПа (табл. 6.11 [2]). Значение модуля сдвига бетона принято равным $G_b = 0,4E_b = 0,4 \cdot 24 \cdot 10^3 = 9,6 \cdot 10^3$ МПа (п. 6.1.15 [2]) и коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$ (п. 6.1.17 [2]). Объем бетона сваи конической формы составляет $V_{\text{св}} = 0,3297$ м³. Опалубкой для набивной сваи служит ще-

ческой формы с учетом нижнего щебневого расширения достигает $3,0$ м.

Грунт основания – песок четвертичного отложения, пылеватый (коэффициент пористости $e = 0,65$) с модулем деформации $E = 18$ МПа, углом внутреннего трения $\varphi = 30$ град., удельным сцеплением $c = 4$ кПа (табл. Б.1 [4]) и коэффициентом Пуассона $\nu = 0,3$ (табл. 5. 10 [4]).

Далее рассмотрим три расчетно-пространственные модели с разными нагрузками:

Модель №1 – внешняя горизонтальная нагрузка на сваю $P = 100$ кН (10 т) (см. рис. 2);

Модель №2 – внешняя вертикальная нагрузка $N = 1000$ кН (100 т) (см. рис. 3);

Модель №3 – суммарное нагружение, т. е. одновременное приложение двух нагрузок – горизонтальной $P = 100$ кН и вертикальной $N = 1000$ кН (см. рис. 4).

Для поверочного расчета сваи на горизонтальное перемещение целесообразно использовать дискретную расчетную схему, подобную приведенной в [5, 6].

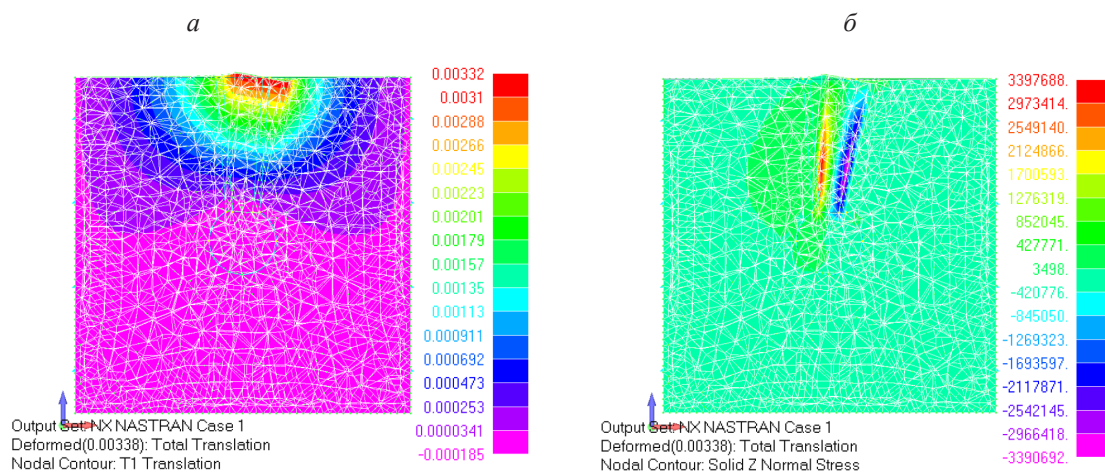


Рис. 2. Расчетно-пространственная модель с горизонтальной нагрузкой $P = 100$ кН: а – перемещение сваи в метрах; б – нормальное напряжение σ по оси Z в Н/м^2 в свае и массиве грунта

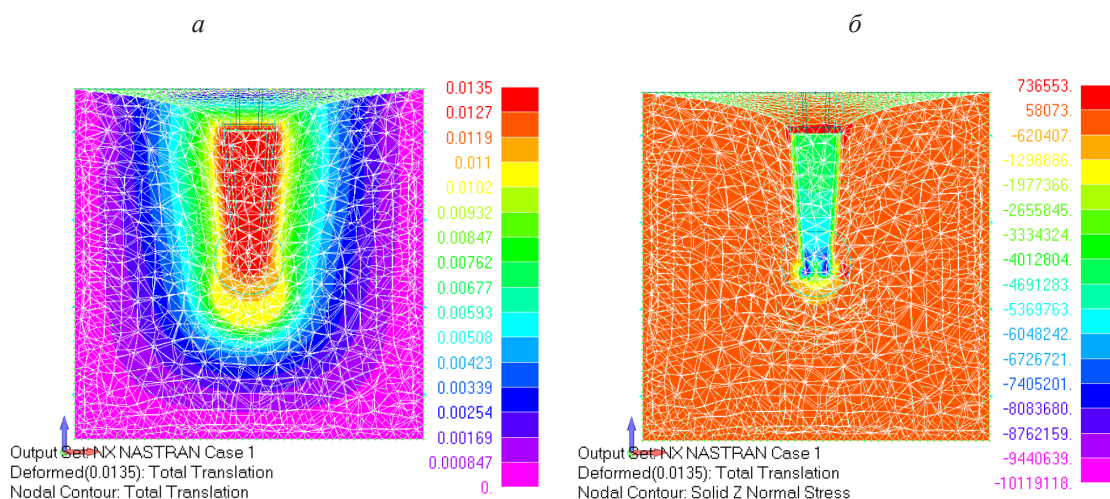


Рис. 3. Расчетно-пространственная модель с вертикальной нагрузкой $N = 1000$ кН: а – перемещение сваи и массива грунта в метрах; б – нормальные напряжения σ по оси Z в Н/м^2 в свае и массиве грунта

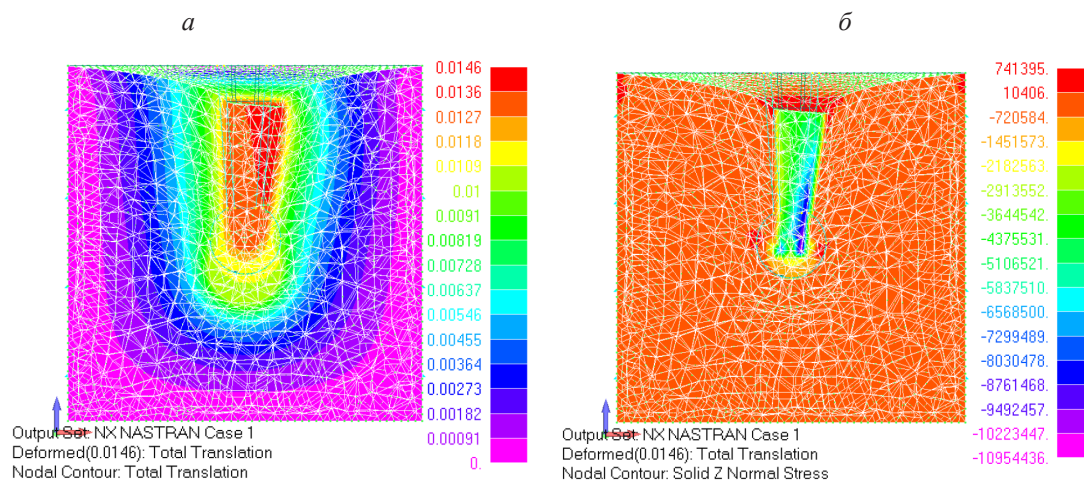


Рис. 4. Расчетно-пространственная модель с горизонтальной $P=100$ кН и вертикальной $N=1000$ кН силами:

a – перемещение сваи и массива грунта в метрах; b – нормальное напряжение σ по оси Z в Н/м^2 в свае и массиве грунта

Для сопоставительного расчета выбрана монолитная железобетонная свая конической формы длиной $L = 2,0$ м без щебневого расширения на конце сваи и свая квадратного сечения с размерами $0,4 \times 0,4$ м длиной $L=2,0$ м с равным объемом $V=0,32$ м³. Причем свая квадратного сечения имеет щебне-

вое расширение диаметром 1 м. Результаты расчета свай при равных внешних нагрузках приводятся в табл. 1 и 2, рис. 5, 6, 7. Расчет выполнен в программном комплексе FEMAP / NX NASTRAN с использованием объемного элемента Solid по форме четырехугольной тетраэдр.

Таблица 1

Результаты расчета свай на горизонтальную нагрузку P

№ п/п изоллий	Горизонтальное перемещение V , ($\times 10^{-3}$ м) при P (кН):											
	100				300				500			
	Конусо-образная свая		Прямо-угольная свая		Конусо-образная свая		Прямо-угольная свая		Конусо-образная свая		Прямо-угольная свая	
	с уши-рением	без уши-рения	с уши-рением	без уши-рения	с уши-рением	без уши-рения	с уши-рением	без уши-рения	с уши-рением	без уши-рения	с уши-рением	без уши-рения
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1.	3,32	4,33	4,10	4,46	9,97	13,00	12,30	13,38	16,6	21,63	20,50	22,30
2.	3,10	3,99	3,83	4,13	9,31	12,00	11,50	12,39	15,5	19,99	19,10	20,65
3.	2,88	3,65	3,55	3,81	8,65	10,90	10,60	11,43	14,4	18,25	17,70	19,05
4.	2,66	3,31	3,27	3,48	7,99	9,94	9,82	10,44	13,3	16,51	16,40	17,40
5.	2,45	2,97	3,00	3,15	7,34	8,92	8,99	9,45	12,2	14,87	15,00	15,75
6.	2,23	2,64	2,72	2,82	6,68	7,91	8,16	8,46	11,1	13,14	13,60	14,10
7.	2,01	2,30	2,44	2,50	6,02	6,89	7,33	7,50	10,0	11,49	12,20	12,50
8.	1,79	1,96	2,17	2,17	5,36	5,88	6,50	6,51	8,94	9,79	10,80	10,85
9.	1,57	1,62	1,89	1,84	4,71	4,86	5,67	5,52	7,84	8,10	9,45	9,20
10.	1,35	1,28	1,61	1,51	4,05	3,86	4,84	4,53	6,75	6,41	8,07	7,55
11.	1,13	0,94	1,34	1,19	3,39	2,83	4,02	3,57	5,65	4,72	6,69	5,95
12.	0,91	0,61	1,06	0,86	2,73	1,82	3,19	2,58	4,56	3,02	5,31	4,30
13.	0,69	0,26	0,78	0,53	2,08	0,80	2,36	1,59	3,46	-1,34	3,93	2,65
14.	0,47	-0,07	0,51	0,20	1,42	-0,21	1,53	0,60	2,36	-0,35	2,55	1,00
15.	0,25	-0,41	0,23	-0,12	0,76	-1,23	-0,07	-0,36	1,27	-2,05	1,17	-0,60
16.	0,03	-0,74	-0,04	-0,45	0,10	-2,24	-0,13	-1,35	0,17	-3,74	-0,22	-2,25
17.	-0,18	-1,09	-0,32	-0,77	-0,55	-3,26	-0,96	-2,31	-0,93	-5,43	-1,60	-3,85

Таблица 2

Результаты расчета свай на вертикальную нагрузку N

№ п/п изо- ли- ний	Вертикальное перемещение s , ($\times 10^{-3}$ м) при N (кН):											
	1000				3000				5000			
	Конусо- образная свая		Прямо- угольная свая		Конусо- образная свая		Прямо- угольная свая		Конусо- образная свая		Прямо- угольная свая	
	с уши- рением	без уши- рения	с уши- рением	без уши- рения	с уши- рением	без уши- рения	с уши- рением	без уши- рения	с уши- рением	без уши- рения	с уши- рением	без уши- рения
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1.	13,5	22,8	14,2	20,8	40,6	68,5	42,6	62,4	67,7	114	71,0	104
2.	12,7	21,4	13,3	19,5	38,1	64,3	39,9	58,5	63,5	107	66,5	97,5
3.	11,9	20,0	12,4	18,2	35,6	60,0	37,3	54,6	59,3	100	62,1	91,0
4.	11,0	18,6	11,5	16,9	33,0	55,7	34,6	50,7	55,0	92,8	57,7	84,5
5.	10,2	17,1	10,6	15,6	30,5	51,4	31,9	46,8	50,8	85,7	53,2	78,0
6.	9,32	15,7	9,76	14,3	27,9	47,1	29,3	42,9	46,6	78,5	48,8	71,5
7.	8,37	14,3	8,87	13,0	25,4	42,8	26,6	39,0	42,3	71,4	44,4	65,0
8.	7,62	12,9	7,98	11,7	22,9	38,6	24,0	35,1	38,1	64,3	39,9	58,5
9.	6,77	11,4	7,10	10,4	20,3	34,3	21,3	31,2	33,9	57,1	35,5	52,0
10.	5,93	10,0	6,21	9,10	17,8	30,0	18,6	27,3	29,6	50,0	31,0	45,5
11.	5,08	8,57	5,32	7,80	15,2	25,7	16,0	23,4	25,4	42,8	26,6	39,0
12.	4,23	7,14	4,44	6,50	12,7	21,4	13,3	19,5	21,2	35,7	22,2	32,5
13.	3,39	5,71	3,55	5,20	10,2	17,1	10,6	15,6	16,9	28,6	17,7	26,0
14.	2,54	4,28	2,66	3,90	7,62	12,9	7,98	11,7	12,7	21,4	13,3	19,5
15.	1,69	2,86	1,77	2,60	5,08	8,57	5,32	7,80	8,47	14,3	8,87	13,0
16.	0,85	1,43	0,89	1,30	2,54	4,28	2,66	3,90	4,23	7,14	4,44	6,50
17.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

а

б

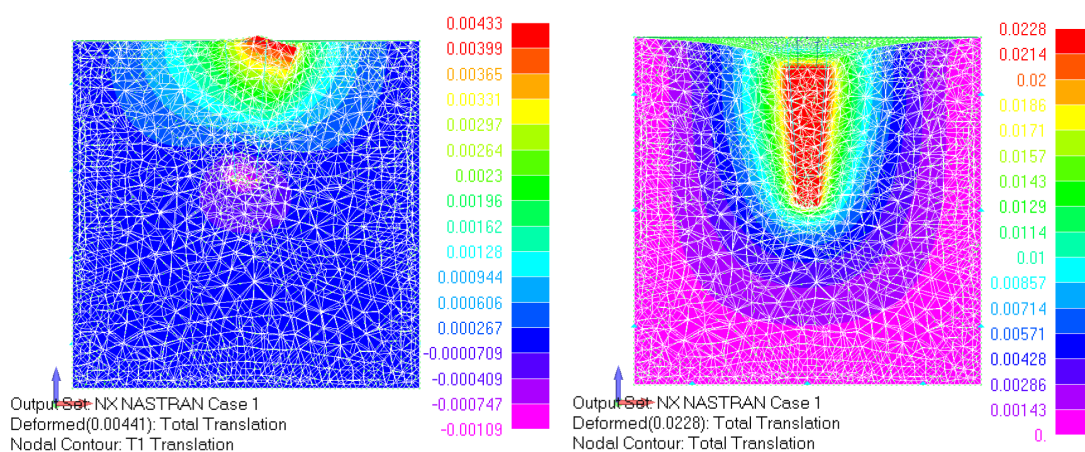


Рис. 5. Конусообразная свая без нижнего щебневого уширения:

а – перемещения V , (м) от горизонтальной нагрузки $P=100$ кН; б – осадка s , (м) от вертикальной нагрузки $N=1000$ кН

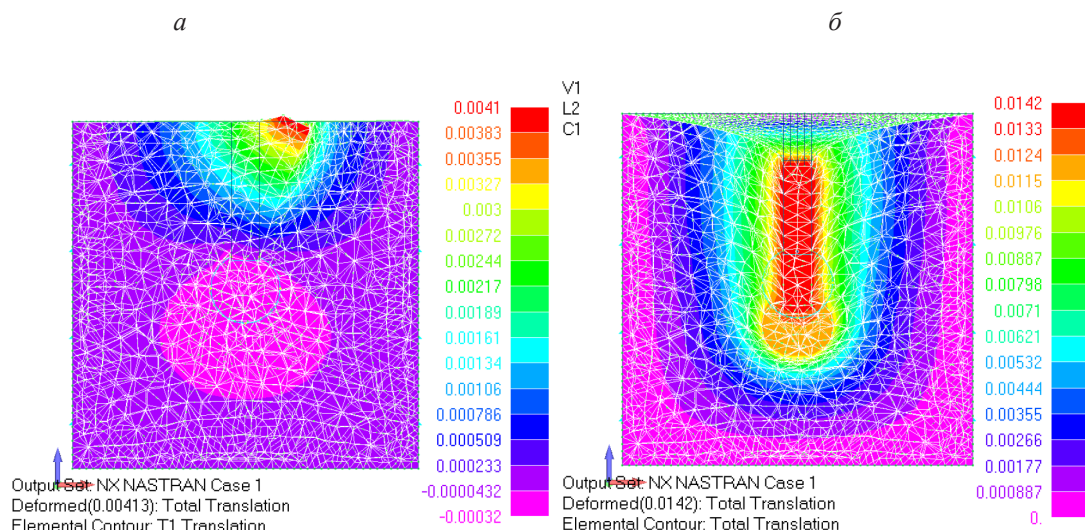


Рис. 6. Прямоугольная свая с нижним щебневым уширением:
а – перемещения V (м) от горизонтальной нагрузки $P = 100$ кН; б – осадка s (м) от вертикальной нагрузки $N = 1000$ кН

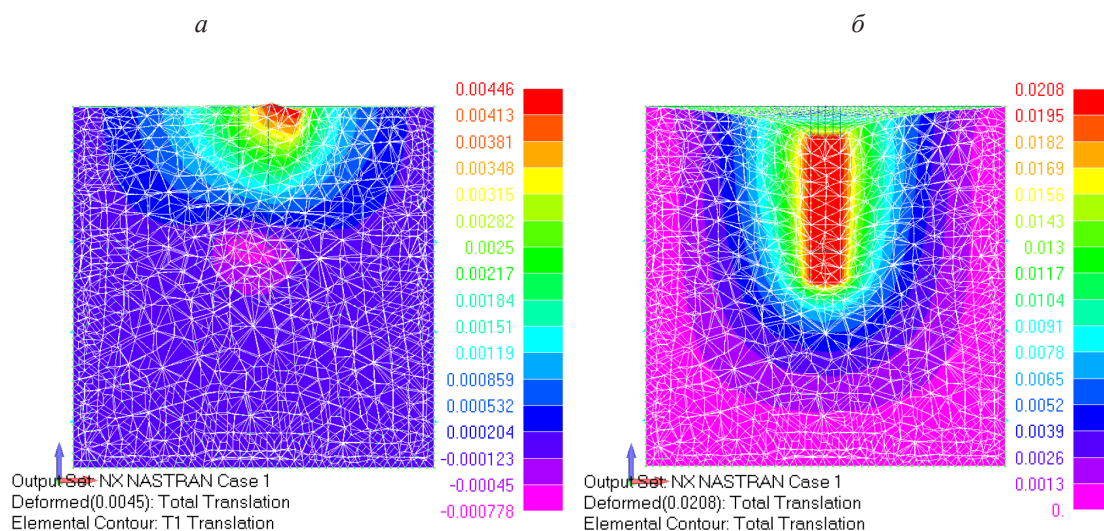


Рис. 7. Прямоугольная свая без нижнего щебневого уширения:
а – перемещения V , (м) от горизонтальной нагрузки $P = 100$ кН; б – осадка s , (м) от вертикальной нагрузки $N = 1000$ кН

Основные выводы

Анализ результатов расчетов показал, что форма сваи и щебневое расширение оказывают существенное влияние на перемещение сваи и околосвайного пространства. В частности, щебень уменьшает горизонтальное смещение ее нижнего конца. Например, для сваи конической формы с расширением горизонтальное смещение V при нагрузке $P = 100$ кН составит $0,185 \times 10^{-3}$ м (рис. 2а), для сваи конической

формы без расширения – $V = 1,09 \times 10^{-3}$ м (рис. 5а), для прямоугольной сваи с щебневым расширением – $V = 0,32 \times 10^{-3}$ м (рис. 6а), а для сваи прямоугольной сваи без щебневого расширения – $V = 0,778 \times 10^{-3}$ м (рис. 7а, табл. 1).

Расчеты показывают, что для сваи конической формы с нижним щебневым расширением (прямая – 1) при вертикальной нагрузке $N = 7000$ кН максимальная осадка s составила $0,0948$ м (рис. 8). Как известно,

расчет оснований по деформациям производят исходя из условия $s \leq \Delta s$, где Δs – предельная осадка равная 0,1 м (табл. Д.1 [4]), $s = 0,0948 \text{ м} \leq \Delta s = 0,1 \text{ м}$. Следовательно, свая конической формы со щебневым нижним расширением обладает, при действии вертикальных нагрузок, более высокой несущей способностью и жесткостью, в сравнении со свай традиционной формы. Так, для сваи обычной (прямоугольной) формы с нижним щебневым расширением (прямая – 2) при вертикальной нагрузке $N=6000 \text{ кН}$ расчетная осадка составила $s=0,0852 \text{ м}$. Для конической формы без нижнего щебневого расширения (прямая – 3) при вертикальной нагрузке $N=4000 \text{ кН}$ расчетная осадка сваи $s=0,0912 \text{ м}$, а для прямоугольной сваи (прямая – 4) при $N=4000 \text{ кН}$ – $s=0,0832 \text{ м}$ (рис. 8).

Таким образом, щебневое расширение уменьшает осадку, вызванную внешними нагрузками, что является важным экономическим фактором. Расширение позволяет использовать висячую сваю конической

формы в виде сваи – стойки конической или обычной формы.

Форма сваи в виде конуса обеспечивает, в отличие от обычной сваи, большую сопротивляемость горизонтальным нагрузкам P (рис. 2, 5), оказывающим наибольшее давление на грунт в ее верхней части. Таким образом, если вокруг монолитной железобетонной сваи конусообразной формы создана уплотненная грунтово-щебневой оболочка, то горизонтальное смещение сваи от нагрузки P будет незначительно. Если в нижнем конце сваи создается щебневое расширение, то послойно забитый в грунт щебень ограничит горизонтальное смещение нижнего конца сваи. При действии больших вертикальных нагрузок N щебневая оболочка и щебневое расширение, а также создаваемый, согласно принятой технологии, утрамбованный слой грунта вокруг щебня обеспечивают большую сопротивляемость сваи и существенно уменьшают величину осадки (рис. 8).

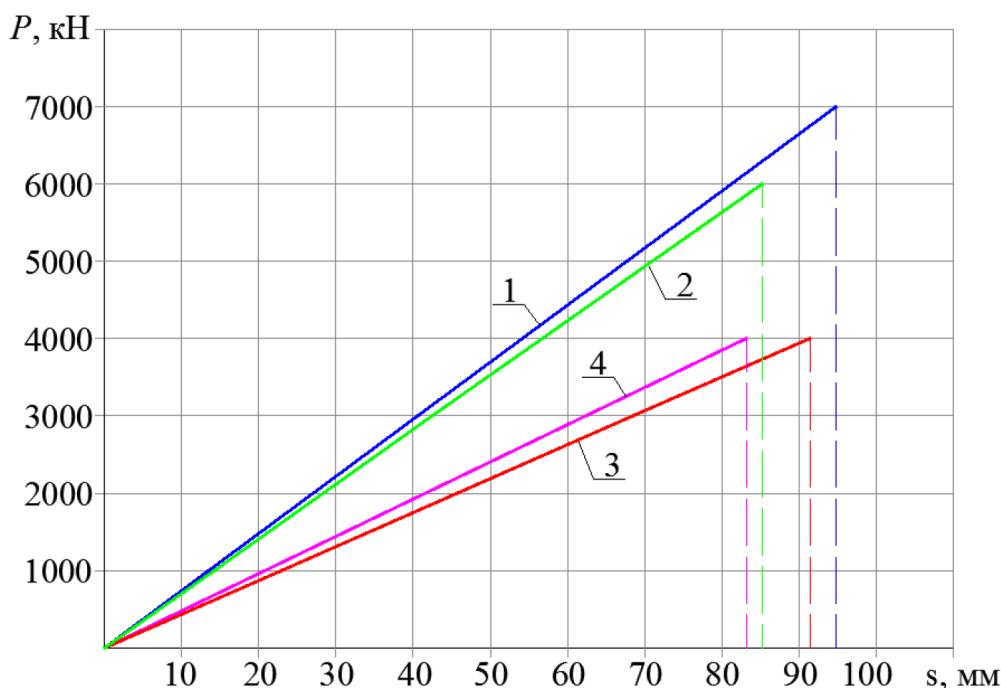


Рис. 8. График нагрузка P (кН) – осадка s (мм):

1 – свая конусообразной формы с щебневым расширением; 2 – прямоугольная свая с щебневым нижним расширением; 3 – свая конусообразной формы без щебневого расширения; 4 – прямоугольная свая без щебневого расширения

Потребность в монолитной железобетонной конусообразной свае возникает в связи с необходимостью минимизации вертикальной осадки s по периметру пристроя. В указанной ситуации забивка свай традиционной (прямоугольной) формы может представлять опасность, особенно если забивка осуществляется на глубину свай основного здания. Забивка щебня вибратором на глубине $L + (0,5 \div 0,7L)$ не будет вызывать для здания опасных сотрясений. К тому же создание фундамента на основе монолитных железобетонных свай конической формы со щебневой оболочкой вокруг нее и нижним расширением оказывается целесообразным не только с конструктивной, но и с экономической точки зрения.

Список литературы

1. Патент на полезную модель № 2015107101/03, 02.03.2015.
2. Кужахметова Э.Р., Сапожников А.И. Конструкция монолитной железобетонной сваи конической формы // Патент России №157318.2015. Бюл. № 33.
3. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции.
4. Методические рекомендации по повышению качества дорожных оснований из щебня различных пород. – М.: СоюзДОРНИИ, 1980.
5. СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений.
6. Кужахметова Э.Р. Сравнительный анализ работы длинных и коротких свай при горизонтальном нагружении / Э.Р. Кужахметова, А.И. Сапожников // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2015. – №5–6. – С. 32–36.
7. Сапожников А.И. Способы погружения, прочностные и деформационные расчеты свай / А.И. Сапожников, Э.Р. Кужахметова, 2015. – 71 с.: ил.