DOI: 10.15593/2224-9826/2016.4.09

УДК 624.154.1

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ОСАДОК СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ С УДАЛЕННОЙ ЦЕНТРАЛЬНОЙ СВАЕЙ

А.П. Малышкин, А.В. Есипов

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 27 сентября 2016
Принята: 10 октября 2016
Опубликована: 28 декабря 2016

Ключевые слова:

свайный фундамент, расчет осадок, модель Мора–Кулона, модель линейно деформируемого твердого тела, расчет по деформациям

АННОТАЦИЯ

Численные исследования свайных фундаментов при их расчете по деформациям на сегодняшний день являются особенно актуальными. Изучение напряженно-деформированного состояния основания свайных фундаментов дает возможность оптимизации конструкций фундаментов, снижения их материалоемкости и затрат на строительство. Расчеты свайных фундаментов по первой и второй группам предельных состояний, рекомендованные строительными нормами и правилами, выполняются по различным расчетным моделям и не имеют единой универсальной структуры. Реализация численных экспериментов фундаментов различных конструкций позволяет в короткие сроки оценить эффективность работы фундаментов по нелинейным моделям грунтового основания, близким к действительной работе глинистых грунтов. Сложившийся алгоритм проектирования столбчатых свайных фундаментов под сосредоточенные нагрузки от колонн сводится к следующему: определение необходимого количества свай (требования первой группы предельных состояний) и расчет осадок как условного фундамента (требования второй группы предельных состояний). При этом в расчете осадок никаким образом не участвует общее количество свай в фундаменте, а играют роль только его габариты. Возникает закономерный вопрос: как влияет уменьшение количества свай в составе столбчатого свайного фундамента на напряженно-деформированное состояние грунтового основания и осадки условного фундамента без изменения его габаритов? Сравнительные численные исследования свайных кустов с пятью и четырьмя сваями, а также с девятью и восемью сваями показали, что удаление центральной сваи приводит к незначительному увеличению осадки фундамента и увеличению армирования ростверка. Проведение натурных экспериментов и создание единой расчетной модели свайных фундаментов являются задачами дальнейших исследований.

© ПНИПУ

© Малышкин Александр Петрович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: a.petrovich.m@yandex.ru.
Есипов Андрей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: sibstroy.2012@yandex.ru.

Aleksandr P. Malyshkin – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: a.petrovich.m@yandex.ru.
Andrei V. Esipov – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: sibstroy.2012@yandex.ru.

NUMERICAL RESEARCHES STRESS-STRAIN STATE AND DISPLACEMENTS OF PILE FOUNDATIONS WITH REMOTE CENTRAL PILE

A.P. Malyshkin, A.V. Esipov

Industrial University of Tiumen, Tiumen, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 27 September 2016
Accepted: 10 October 2016
Published: 28 December 2016

Keywords:

pile foundation, displacements
calculation model Mohr–Coulomb
model linearly deformable solid
body, calculation of the deforma-
tions

ABSTRACT

Numerical study of pile foundations in the calculation of the deformations of today are particularly relevant. Studies of the stress-strain state of the base pile foundation enables optimization of foundations, reduce their material consumption and construction costs. Calculations of pile foundations on the first and second groups of limit states recommended building codes and regulations are executed on different calculation models and do not have a single universal structure. Execution numerical experiments foundations of different constructions allowing you to quickly evaluate the effectiveness of the foundations for non-linear models of subgrade closest to the real work of clayey soils. The existing algorithm designing columnar pole foundations under point load of columns reduced to the following: the definition of the required number of piles (the requirements of the first group of limiting states) and the calculation of displacement as a conditional foundation (the requirements of the second group of limit states). When calculating displacement in no way participates in the total number of foundation piles, and play a role only its size. The question arises: What effect does the reduction in the number of piles in the composition of the columnar pile foundation on the stress-strain state of the subgrade and foundation displacement conditional, without changing its size. The comparative numerical researches of pile groups five and four piles and with eight and nine piles have shown that removal of the central of the pile leads to a slight increase in displacement the foundation and an increase in reinforcement raft foundation. Carrying out of field experiments and the creation of a unified calculation model of pile foundations is the task of further research.

© PNRPU

В сложившейся практике проектирования и существующей системе требований государственной экспертизы проектной документации нахождение оптимальной конструкции несущих элементов и фундаментов сооружения должно вестись путем разработки нескольких вариантов конструктивных систем, и этот процесс принято называть вариантным проектированием. Проектировщик, рассчитав произвольно пару вариантов фундаментных конструкций, полагает, что эти требования формально выполнены, однако на практике задача оптимизации строительных конструкций и фундаментов не решается, тем более что заказчик, желая сэкономить, требования вариантного проектирования в техническое задание на проектирование не закладывает.

В строительстве под оптимальной конструкцией понимается такая конструктивная система, у которой при обязательном выполнении каких-либо необходимых требований: несущей способности, жесткости, прочности, устойчивости и т.д. – один или несколько параметров, например материалоемкость или стоимость строительства, являются минимальными [1].

В математике этот процесс называется нахождением условного экстремума, который сводится к нахождению минимума целевой функции (например, расход бетона на фундамент) при условии, что аргументы функции связаны между собой уравнением связи (например, несущая способность фундамента) [2]. Ситуация осложняется большим количеством одновременно действующих требований к одной и той же конструкции: стоимость и трудоемкость изготовления, транспортабельность, материалоемкость, надежность, долговечность и т.д., как правило, приводящих к совершенно противоположным результатам проектирования. Иными словами, долговечность и надежность нередко идут в противо-

речие с материалоемкостью конструкций, а транспортабельность отдельных конструкций противоречит скорости возведения сооружения в целом.

Если говорить только о расчетной инженерной стороне вопроса, то задача нахождения оптимальной конструкции фундамента сводится к разработке такой эффективной конструкции, в которой не будет условно лишних элементов, а оптимальной конструкция фундамента будет в том случае, когда отдельные элементы фундамента (ростверк и сваи) будут полностью исчерпывать свою несущую способность в одно и то же время.

Таким образом, совершенствование методов расчета и оптимальное проектирование любой инженерной системы в целом и конструкций свайных фундаментов в частности являются важными задачами для инженера-конструктора.

В действительности сваи в составе фундамента при загрузке его сосредоточенной силой воспринимают разные нагрузки [3]. Распределение нагрузок между сваями в составе фундамента связано с их взаимным влиянием и особенностями физико-механических характеристик грунтового основания. В связи с этим оптимальное распределение свай в составе фундамента, применение свай различной длины и конструкции в составе одного фундамента являются задачами повышения эффективности и оптимального проектирования свайных фундаментов.

Предметом представленных в настоящей статье численных исследований явились четырех-, пяти-, восьми- и девятисвайные кусты, объединенные высоким жестким ростверком.

Целью работы стало проведение качественной и количественной сравнительной оценки работы столбчатых пяти- и девяти-, а также четырех- и восьмисвайных фундаментов. Особенностью конструкций четырех- и восьмисвайных фундаментов явилось то, что их габариты и расположение свай получались автоматически, путем удаления центральной сваи из пяти- и девятисвайных фундаментов. Геометрические размеры свайных кустов представлены на рис. 1.

Рис. 1. Геометрические параметры свайных фундаментов: *а* – пяти-, четырехсвайный фундамент; *б* – девяти-, восьмисвайный фундамент
Fig. 1. The geometric parameters of pile foundations: *a* – 5-, 4-pile foundation; *b* – 9-, 8-pile foundation

В ходе работы:

- выполнено сравнение осадок пяти- и четырех-, а также девяти- и восьмисвайных фундаментов между собой;
- найдены усилия в сваях в составе четырех-, пяти-, восьми- и девятисвайных фундаментов;
- определены изгибающие моменты в ростверках, выполнено их сравнение для пяти- и четырех-, а также девяти- и восьмисвайных фундаментов;
- сделаны выводы об изменении осадок фундаментов в случае разреженного шага свай.

Поскольку настоящая работа является фрагментом более больших численных экспериментов авторов в данной области, для возможности сопоставления результатов физико-механические характеристики грунтов приняты согласно СП 24.13330.2011 «Свайные фундаменты».

Расчеты осадок и напряженно-деформированного состояния грунтового основания, распределение усилий между сваями и оценка усилий в ростверках выполнялись в нелинейной постановке по упругопластической модели Мора–Кулона и в линейной постановке по подели линейно деформируемого твердого тела (ЛДТТ) в геотехнической программе Plaxis 3D Foundation. Деформации основания от собственного веса грунта, изготовления фундаментов и устройства свай не учитывались.

Несущая способность одиночной призматической железобетонной сваи С60-30 длиной 6 м, сечением 300×300 мм при осадке $s = \zeta \cdot s_{u, m} = 0,2 \cdot 150 = 30$ мм согласно п. 7.3.5 СП 24.13330.2011 «Основания зданий и сооружений» составила 665 кН см. График «нагрузка – осадка» представлен на рис. 2.

Рис. 2. График «нагрузка – осадка» для одиночной сваи С60-30
Fig. 2. Graph load – settlement for single pile C60-30

При удельной нагрузке на сваю 665 кН предельная нагрузка на четырех- и пятисвайные кусты составляет 3325 кН, на восьми- и девятисвайные – 5985 кН. При этом для построения графиков «нагрузка – осадка» максимальная нагрузка на свайные кусты задавалась больше расчетной несущей способности фундаментов 4326 и 7780 кН.

На рис. 3 представлено сравнение графиков «нагрузка – осадка» для четырех-, пяти-, восьми- и девятисвайных фундаментов. Вертикальные линии отражают несущую способность пяти- и девятисвайных фундаментов.

Рис. 3. Графики «нагрузка – осадка» для пяти-, четырех-, девяти- и восьмисвайных фундаментов по модели Мора–Кулона

Fig. 3. Graphs of load – settlement 5-, 4-, 9- and 8-pile foundations on the model of Mohr–Coulomb

В табл. 1 приведено сравнение осадок фундаментов при нагрузке соответствующей несущей способности пяти- и девятисвайных фундаментов.

Таблица 1

Сравнение осадок пяти-, четырех-, девяти- и восьмисвайных фундаментов при нагрузке на фундамент, соответствующей несущей способности свай

Table 1

Comparison of the precipitate of 5- and 4-, 9- and 8-pile foundation load on foundation relevant bearing capacity of the pile

Нагрузка на фундамент, кН	Классический фундамент	Фундамент с удаленной центральной свайей	Приращение осадки, мм	Приращение осадки, %
3325	Осадка пятисвайного фундамента, равная 59,4 мм	Осадка четырехсвайного фундамента, равная 63,9 мм	4,5	7,6
5985	Осадка девятисвайного фундамента, равная 102,9 мм	Осадка восьмисвайного фундамента, равная 105,9 мм	3	2,9

Из табл. 1 видно, что виртуальное удаление центральной свай в пяти- и девятисвайных фундаментах привело к образованию четырех- и восьмисвайных фундаментов, расчетная осадка которых увеличилась на 4,5 (7,6 %) и 3 мм (2,9 %) при расчетной перегрузке фундаментов на 20 и 11 % соответственно.

Непропорциональная зависимость между увеличением нагрузки на сваю и ростом осадки фундамента в целом объясняется перераспределением деформаций в межсвайном пространстве. На рис. 4, 5 представлены изолинии деформаций в основании пяти- и четырехсвайных фундаментов.

Рис. 4. Распределение деформаций в основании пяти- и четырехсвайных фундаментов по модели Мора–Кулона (сечение по центральной свае): *a* – пятисвайный фундамент; *б* – четырехсвайный фундамент

Fig. 4. The strain distribution in the base 5- and 4-pile foundations on the model of Mohr–Coulomb (cross-section along the central pile): *a* – 5-pile foundation; *b* – 4-pile foundation

Рис. 5. Распределение деформаций в основании пяти- и четырехсвайных фундаментов по модели Мора–Кулона (сечение по крайним сваям): *a* – пятисвайный фундамент; *б* – четырехсвайный фундамент

Fig. 5. The strain distribution in the base 5- and 4-pile foundations on the model of Mohr–Coulomb (cross-section at piles): *a* – 5-pile foundation; *b* – 4-pile foundation

На рис. 6 представлены изолинии деформаций в основании девяти- и восьмисвайных фундаментов.

Рис. 6. Распределение деформаций в основании девяти- и восьмисвайных фундаментов по модели Мора–Кулона (сечение по центру фундамента): *а* – девятисвайный фундамент; *б* – восьмисвайный фундамент

Fig. 6. The strain distribution in the base 9-, and 8-pile foundations on the model of Mohr–Coulomb (cross-section in the center of the foundation): *a* – 9-pile foundation; *b* – 8-pile foundation

На рис. 4–6 видно, что виртуальное удаление центральной сваи и видоизменение конструкции фундамента приводят к изменению характера кривых деформаций грунта. Однако взаимное влияние свай в кусте и наложение зон напряжений не позволяют работать сваям, оставшимся в составе фундамента, как одиночным. Одновременно с этим численное моделирование не учитывает уплотнения грунта в межсвайном пространстве, возникающее при забивке свай, что еще более увеличивает их взаимное влияние и совместную работу.

Распределение нагрузки между сваями в линейной и нелинейной постановке задачи представлены в табл. 2, 3.

Таблица 2

Распределение нагрузки в сваях по модели ЛДТТ, кН

Table 2

Load distribution in piles on the model of linearly deformable solid bodies, kN

Расположение свай в ростверке	Ростверк 1,6×1,6 м с нагрузкой 3325 кН			Ростверк 2,1×2,1 м с нагрузкой 5985 кН		
	5 свай	4 сваи	Δ , %	9 свай	8 свай	Δ , %
Угловая	727,5	789,97	9,8	848,3	864,8	1,9
Средняя в ряду	—	—	—	540,86	577,98	6,9
Центральная	297,8	—	—	222,98	—	—

В упругой постановке задачи при расчете грунтового основания по модели ЛДТТ усилия, возникающие в центральной свае, незначительные и составляют для пятисвайного фундамента 40 %, для девятисвайного фундамента 26 %, считая от усилия в угловой свае (см. табл. 2). Увеличение усилий в сваях в четырех- и восьмисвайных фундаментах по отношению к сваям в пяти- и девятисвайных фундаментах также незначительное. В четырехсвайном фундаменте нагрузка на сваю увеличилась на 9,8 %. В восьмисвайном фундаменте нагрузка на угловую сваю выросла на 1,9 %, на среднюю в ряду сваю – на 6,9 %.

Таблица 3

Распределение нагрузки в сваях по модели Мора–Кулона, кН

Table 3

Load distribution in piles on the model of Mohr–Coulomb, kN

Расположение свай в ростверке	Ростверк 1,6×1,6 м с нагрузкой 3325 кН			Ростверк 2,1×2,1 м с нагрузкой 5985 кН		
	5 свай	4 сваи	Δ , %	9 свай	8 свай	Δ , %
Угловая	652	802,3	23	664,9	717,52	7,9
Средняя в ряду	–	–	–	652,9	737,8	13
Центральная	540	–	–	536,8	–	–

В упругопластической постановке задачи при расчете грунтового основания по модели Мора–Кулона усилия в центральной свае для пятисвайного фундамента на 18 % меньше, чем усилие в крайней свае, для девятисвайного фундамента – на 20 % (см. табл. 3). В четырехсвайном фундаменте по отношению к пятисвайному нагрузка на сваю увеличилась на 23 %. В восьмисвайном фундаменте по отношению к девятисвайному нагрузка на угловую сваю выросла на 7,9 %, на среднюю в ряду сваю – на 13 %.

Виртуальное удаление центральной сваи приводит также к увеличению внутренних усилий в ростверках. Изгибающие моменты в ростверках четырех-, пяти-, восьми- и девятисвайных фундаментов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Изгибающие моменты и продольное армирование в ростверках*

Table 4

Bending moments and longitudinal reinforcement in pile caps

Показатель	Ростверк 1,6×1,6 м с нагрузкой 3325 кН			Ростверк 2,1×2,1 м с нагрузкой 5985 кН		
	5 свай	4 сваи	Δ , %	9 свай	8 свай	Δ , %
Изгибающий момент, кН·м	174,2	265,8	52,5	177,2	261,8	47,7
Требуемая арматура А400	$\varnothing = 12$ мм, $S = 200$ мм	$\varnothing = 14$ мм, $S = 200$ мм	–	$\varnothing 12$ мм, $S = 200$ мм	$\varnothing = 14$ мм, $S = 200$ мм	–

Примечание: * – при толщине ростверка 600 мм.

Изгибающие моменты в плите ростверка четырехсвайного фундамента по отношению к пятисвайному выросли на 52,5 %, в плите ростверка восьмисвайного фундамента по отношению к девятисвайному – на 47,7 %. Увеличение внутренних усилий привело

также к необходимости увеличения армирования продольной арматурой. Диаметр ($\varnothing$) требуемой арматуры увеличился на один типоразмер с 12 до 14 мм, что, в свою очередь, некритично.

По результатам выполненных численных исследований работы столбчатых пяти- и девяти-, а также четырех- и восьмисвайных фундаментов можно сделать следующие выводы:

1. Сокращение количества свай в фундаменте приводит к гораздо меньшему приращению его осадки, что весьма эффективно при создании экономичных конструкций фундаментов и проектировании их по предельным осадкам.

2. Незначительное увеличение осадок четырех- и восьмисвайных фундаментов по отношению к осадкам пяти- и девятисвайных фундаментов, а также превышение усилий в сваях по отношению к их теоретической несущей способности не привело к провальным осадкам и «срыву» фундаментов.

3. Превышение нагрузки на сваю в составе фундамента более чем несущая способность одиночной сваи не привело к большим дополнительным осадкам фундаментов.

В качестве задач дальнейших исследований следует подтвердить полученные результаты натурными экспериментами и создать предпосылки для получения новой аналитической модели расчета свайных фундаментов с разреженным шагом свай.

Библиографический список

1. Лихтарников Я.М. Вариантное проектирование и оптимизация стальных конструкций. – М.: Стройиздат, 1979. – 319 с.
2. Есипов А.В. Взаимодействие микросвай с грунтовым основанием при усилении фундаментов: дис. ... канд. техн. наук. – Тюмень, 2002.
3. Бартоломей А.А., Омельчак И.М., Юшков Б.С. Прогноз осадок свайных фундаментов / под ред. А.А. Бартоломея. – М.: Стройиздат, 1994. – 384 с.
4. Есипов А.В., Демин В.А., Ефимов А.А. Численные исследования осадок плитных фундаментов на грунтовом и армированном сваями основаниях // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – С. 181.

References

1. Likhtarnikov Ia.M. Variantnoe proektirovanie i optimizatsiia stal'nykh konstruksii [Variant design and optimization of steel structures]. Moscow: Stroiizdat, 1979. 319 p.
2. Esipov A.V. Vzaimodeistvie mikrosvaii s gruntovym osnovaniem pri usilenii fundamentov [The interaction of micropiles, ground base while strengthening the foundations]. Timen', 2002.
3. Bartolomei A.A., Omel'chak I.M., Iushkov B.S. Prognoz osadok svainykh fundamentov [Forecast settlement pile foundations]. Moscow: Stroiizdat, 1994. 384 p.
4. Esipov A.V., Demin V.A., Efimov A.A. Chislennyye issledovaniia osadok plitnykh fundamentov na gruntovom i armirovannom svaiami osnovaniyakh [Numerical study of raft foundation on clay reinforced with piles and grounds]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniia*, 2014, no. 6, p. 181.