

Разработка конструктивного решения вертикально армированного основания плитного фундамента высотного здания в сейсмическом районе

УДК 62-6

Мариничев Максим Борисович

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Основания и фундаменты» Кубанского государственного аграрного университета (Краснодар, Российская Федерация); e-mail: marinichev@list.ru;

Ткачев Игорь Геннадьевич

аспирант кафедры «Основания и фундаменты» Кубанского государственного аграрного университета, e-mail: igortkachev001@mail.ru

Статья получена: 10.02.2016. Рассмотрена: 17.02.2016. Одобрена: 28.02.2016. Опубликовано онлайн: 28.03.2016. ©РИОР

Аннотация. В статье приводятся результаты численного моделирования поведения высотного здания на слабых глинистых грунтах в сейсмическом районе, в ходе которого удалось проанализировать деформации различных вариантов фундаментов рассматриваемого здания. В качестве основных вариантов фундаментов были рассмотрены: плитный, традиционный свайно-плитный (СПФ) и свайный фундамент с промежуточной подушкой. Проведенная серия численных расчетов в пространственной постановке по определению деформируемости системы «Основание» – «Надземные конструкции здания» выявила благоприятную реакцию фундаментной конструкции на использование промежуточной подушки между сваями и фундаментной плитой здания. Вариант свайного фундамента с промежуточной подушкой (вертикально армированного основания плитного фундамента) позволил не только снизить абсолютные деформации основания

здания, но и уменьшить усилия в свайных элементах по сравнению с традиционным свайно-плитным вариантом. Поэтому такой тип фундамента был предложен как наиболее рациональный для рассматриваемого здания.

Ключевые слова: фундамент, вертикально армированное основание, сваи, деформации грунта, конечно-элементное моделирование.

Введение

В настоящее время на территории Краснодарского края активно ведется высотное строительство жилых и общественных зданий. Однако зачастую возведению таких сооружений препятствуют факторы, связанные со сложными инженерно-геологическими условиями площадок строительства и с высокой сейсмичностью (7–9 баллов) на большей территории края.

DEVELOPMENT OF CONSTRUCTIVE SOLUTIONS VERTICAL REINFORCED BASES OF SLAB FOUNDATION OF HIGH-RISE BUILDINGS IN SEISMIC AREAS

Maxim Marinichev

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, associate professor of Department “Bases and foundations”, Kuban State Agrarian University (Krasnodar, Russian Federation); e-mail: marinichev@list.ru;

Igor Tkachev

Postgraduate Kuban State agricultural university e-mail: igortkachev001@mail.ru

Manuscript received: 10.02.2016. Revised: 17.02.2016. Accepted: 28.02.2016. Published online: 28.03.2016. ©RIOR

Abstract. The article presents the results of a numerical simulation of the behavior of high-rise building on weak clay soils, during which the deformations of different variants of foundations were

analyzed. The main variants of foundations were examined: slab, traditional pile-slab construction and pile foundation with an intermediate base. Series of numerical calculations in spatial statement determine the deformability of the “Base” – “Structures of the building”- system revealed a favorable response for the use of the intermediate base between the piles and foundation slab of the building. Variant of pile foundation with an intermediate base (vertical reinforced base of slab foundation) allowed not only reduce the absolute deformation of base of the building, but also reduce the effort in the pile elements compared to the traditional pile-slab foundation. Therefore, it was proposed as the most rational for this building.

Keywords: foundation, vertical reinforce base, piles, soil deformation, finite element modeling.

Возникает необходимость поиска рациональной фундаментальной конструкции высотного здания. В отечественной и мировой практике строительства высотных зданий предпочтение отдается в основном следующим типам конструкций фундаментов:

- массивный плитный;
- свайный;
- свайно-плитный.

Эти типы фундаментов достаточно распространены, но они имеют свою область применимости, ограниченную существующими нормативными документами. Так, например, для плитных фундаментов не всегда удается обеспечить нормативные значения осадок, а также их равномерность. В таких случаях переходят к выбору рационального свайного (свайно-плитного) фундамента, который бы обеспечил допустимую деформируемость грунтового основания. В сейсмических районах и при наличии в основании слабых грунтов действующими нормативными документами (СП 24.13330.2014) предусматривается ряд требований при проектировании свайных фундаментов:

- соединение между ростверком и сваями должно быть жестким;
- значение параметра гибкости для буровых свай не более $l/d < 25$.

Оба этих требования не всегда могут быть выполнены, поскольку при жестком соединении свай с ростверком в головах свай возникают горизонтальные усилия от сейсмического воздействия, которые не может воспринять грунт, окружающий сваю, что приводит к увеличению сечения свай или их количества в фундаменте, а соответственно и стоимости такого решения.

Использование буровых свай может решить проблему восприятия горизонтальных нагрузок, однако при большой толще слабых грунтов или ее залегании на большой глубине применение свайно-плитного фундамента из буронабивных свай оказывается невозможным из-за $l/d > 25$ либо из-за высокой стоимости работ при увеличении диаметра свай.

В этом случае необходимо переходить к рассмотрению возможности локального улучшения строительных свойств грунтов основания. На сегодняшний день улучшение строительных свойств грунтов оснований возможно выполнить различными способами, одни из которых:

- закрепление слабых грунтов по технологии «Jet Grouting»;

- замена слабых грунтов на прочные и малосжимаемые;
- выполнение вертикально армированного основания (свайный фундамент с промежуточной подушкой).

В статье рассмотрен вариант свайного фундамента с промежуточной подушкой для высотных зданий как наиболее рациональный ввиду его особенностей:

- сваи и ростверк конструктивно не связаны, что позволяет снизить влияние сейсмичности площадки строительства при расчетах;
- сваи при данном решении являются не частью свайного фундамента, а частью армированного грунтового массива, выполнение которого позволяет регулировать деформации здания;
- промежуточная разделительная подушка, являясь демпфирующим элементом, позволяет минимизировать горизонтальные усилия, передаваемые на фундамент от надземного строения. Тем самым можно достигать более экономичных решений фундаментов за счет передачи на плиту до 40-45% нагрузки от здания.

Наиболее близким к методу вертикального армирования основания является техническое решение свайного фундамента с промежуточной подушкой [3,4]. Однако для сейсмостойкого высотного строительства этот метод на сегодняшний день изучен недостаточно.

Закономерности распределения нагрузок от высотного здания на армированное вертикальными элементами основание были выявлены путем учета всех факторов системы «армированное основание – промежуточная подушка – плитный ростверк» с применением современных геотехнических программных комплексов, таких как MIDAS GTS NX. Данный программный комплекс позволяет рассчитывать здания и сооружения различной конфигурации в плане и по высоте совместно с основанием и реальным напластованием грунтов. При помощи MIDAS GTS NX выполнены пространственные расчеты реальных объектов, возводимых на территории г. Краснодара и края, с целью обоснования применимости метода вертикального армирования основания для компенсации неравномерной деформируемости плитных фундаментов высотных зданий.

Характеристика грунтов площадки строительства и конструктивного решения высотного здания

При проектировании высотного здания в г. Краснодаре были проанализированы инженерно-геологические условия данной площадки, основными осложняющими особенностями которой стали просадочные грунты ИГЭ-1, расположенные вблизи поверхности ($P_{sl} = 170$ кПа). В средней части разреза выявлен слой торфа сильноразложившегося ИГЭ-4, мощность до 1 метра (см. табл. 1 и рис. 1).

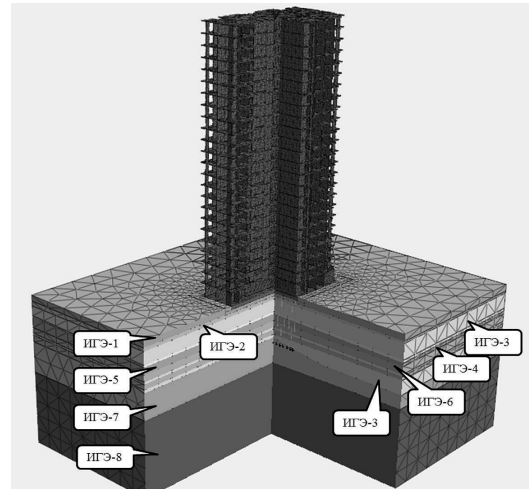


Рис. 1. Общий вид рассматриваемой задачи в Midas GTS NX (с разбиением на материалы)

Таблица 1

Сводная таблица физико-механических характеристик грунтов

| № n \ n | Полное наименование грунта | Мощность, м | Плотность грунта при естественной влажности, ρ , г/см ³ | Коеф. Пористости, e , д.е. | Удельное сцепление c , кПа | Угол внутреннего трения, φ , град. | Модуль общей деформации E , МПа |
|------------|--|-------------|---|------------------------------|------------------------------|--|-----------------------------------|
| | Насыпной неоднородный слежавшийся грунт | 2,1-2,8 | — | — | — | — | — |
| 1 | Суглинок просадочный | 1,8-2,8 | 1,83 | 0,76 | 19 | 20 | 14/7* |
| 2 | Супесь пластичная | 0,5-0,6 | 1,99 | 0,66 | 12 | 14 | 10,5 |
| 3 | Песок мелкий | 4,8-6,0 | 1,96 | 0,63 | - | 32 | 23,0 |
| 4 | Торф сильно разложившийся, высокозольный | 0,9-1,0 | 1,16 | 0,35 | 23 | 19 | 1,0 |
| 5 | Глина тугопластичной консистенции, слабозаторфованная. | 0,9-1,1 | 1,88 | 0,92 | 43 | 17 | 5,0 |
| 6 | Суглинок тугопластичной консистенции | 2,4-4,1 | 1,89 | 0,77 | 27 | 18 | 17,6 |
| 7 | Песок мелкий, плотный | 3,9-4,3 | 2,02 | 0,57 | - | 34 | 32 |
| 8 | Песок средней крупности, плотный | Более 5,0 | 2,05 | 0,57 | - | 34 | 32 |

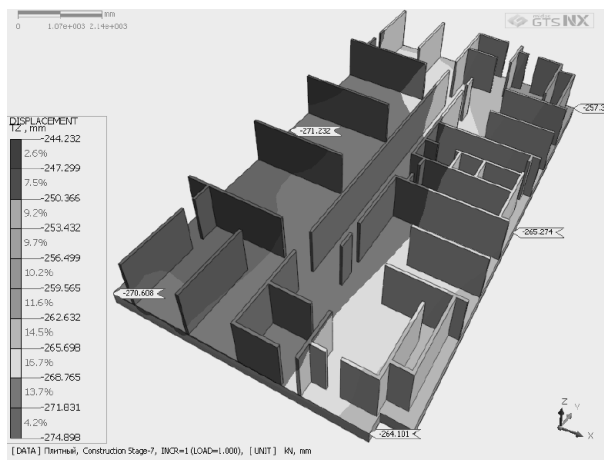
*- в водонасыщенном состоянии

Здание, проектируемое в данных инженерно-геологических условиях, представляет собой монолитный железобетонный каркас, представленный перекрестно-стеновой конструктивной системой. Высота здания достигает 73м и состоит из 24 этажей. Общая масса составляет около 26480 тонн. Среднее распределенное давление по подошве фундамента составляет $P_{cp} = 50$ кПа.

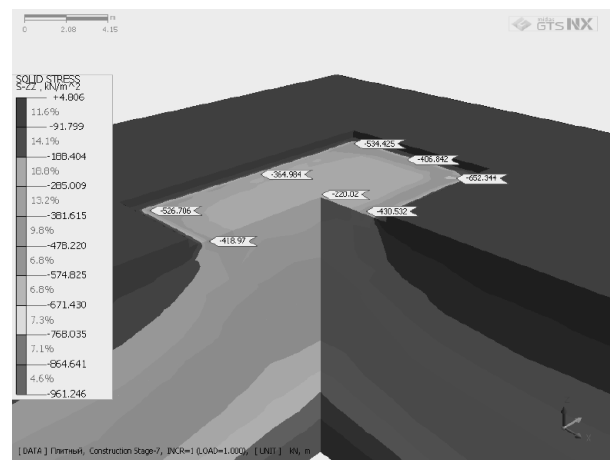
Для прогнозирования осадок такого тяжелого сооружения в инженерно-геологических условиях площадки строительства были выполнены пространственные расчеты для нескольких вариантов фундаментов.

Моделирование и расчет вариантов фундаментов для высотного здания в ПК MIDAS GTS NX

Первым из вариантов рассмотрен плитный фундамент, для которого была назначена толщина фундаментной плиты $h = 1000$ мм (см. рис. 2а). В результате расчетов выявлены значительные деформации плиты ($S_{ф.н.}$), а также недопустимый крен в сторону поднятия слоя торфа и уменьшения мощности слоя ИГЭ-3. Выявленный факт сделал применение плитного фундамента в данных грунтовых условиях необоснованным (см. рис. 2а). Напряжения, вызванные весом здания, превышают началь-

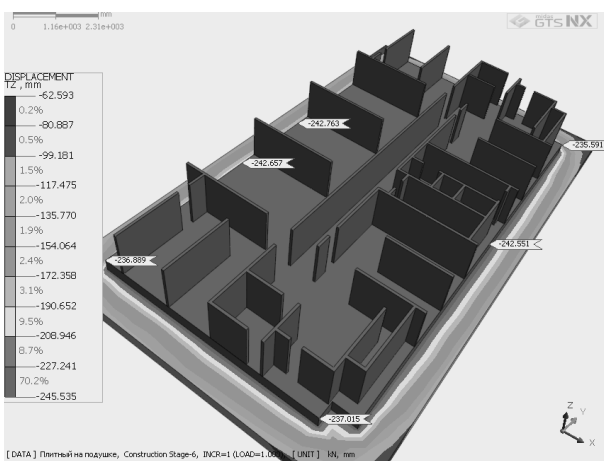


а)

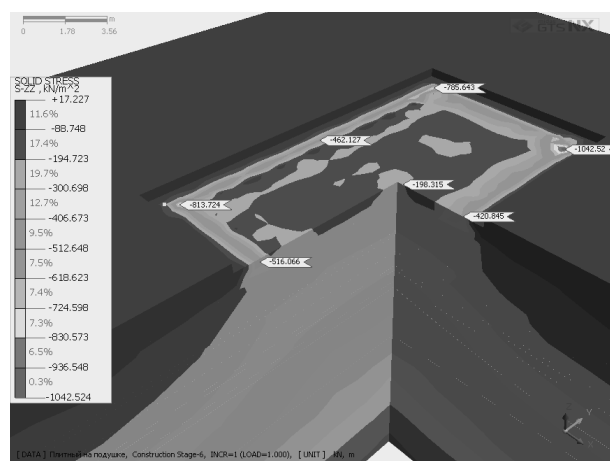


б)

Рис. 2. а) Осадки плитного фундамента на естественном основании (превышение нормативных деформаций $S_u=150$ мм); б) Напряжения под подошвой плитного фундамента (вертикальные напряжения вдоль оси Z)



а)



б)

Рис. 3. а) Осадки плитного фундамента на подушке из щебня; б) Напряжения в грунтовом массиве при использовании предложенного технического решения (вертикальные напряжения вдоль оси Z)

ное просадочное давление ($P_{sl} = 170 \text{ кПа}$) во всех точках под подошвой фундамента. Таким образом, к расчетным деформациям добавятся деформации просадки (см. рис. 2б).

В этой ситуации рассматривался вариант фундамента с заменой просадочного слоя на слой с высокими механическими и жесткостными характеристиками (малодеформируемый щебенистый слой толщиной 1000 мм, $E_0 = 50 \text{ МПа}$, $C = 20 \text{ кПа}$, $\varphi = 35^\circ$).

Для анализа полученных результатов были выбраны точки в плане фундаментной плиты, для которых полученные осадки сравнивались с допустимыми (см. табл. 2).

В результате сравнения установлено, что замена просадочного грунта способствовала снижению осадок на 10% в среднем. Однако данный вариант устройства фундамента проблему высоких осадок не решил (см. рис 3а), но их неравномерность незначительно снизилась благодаря деформационным характеристикам подушки из щебня.

Поскольку ни один из вариантов плитного фундамента не удовлетворял заданным критериям, было принято решение о рассмотрении вариантов

с использованием свай для передачи нагрузок на более прочные грунты основания.

Первым вариантом технического решения фундамента здания стал свайно-плитный фундамент (СПФ) из забивных свай длиной 15 м и сечением 350x350 мм. Конструктивное решение фундаментной части здания показано на рисунке 3а.

Сваи в плане были расположены непосредственно под несущими конструкциями цокольного этажа высотного здания. Соединение свай с ростверком предусматривалось жестким. Общее количество свай в составе свайно-плитного фундамента составило 299 штук. Несущая способность свай в данных грунтовых условиях была определена по СП 24.13330.2011 [1] и составила около 1350 кН.

В результате расчетов были получены осадки здания, удовлетворяющие нормативным требованиям ($S_{max} = 107 \text{ мм}$). После обработки значений передающихся на сваи усилий было установлено, что среднее усилие в каждой свае $N_{cp} = 686,1 \text{ кН}$. При этом осадка здания снизилась на 61%, а доля нагрузки, воспринятой сваями, составила 77,5%.

В качестве второго варианта фундамента было использовано известное техническое решение –

Таблица 2

Сравнение осадок плитных фундаментов рассматриваемых вариантов

| Точки на схеме фундамента | Осадка вариантов фундаментов S_i , мм | | ΔS_i , % | $\frac{S_i - S_u}{S_i}$, % | |
|---------------------------|---|--------------|------------------|-----------------------------|--------------|
| | $S_{ф.п.}$ | $S_{фн.под}$ | | $S_{ф.п.}$ | $S_{фн.под}$ |
| 1 | 270,608 | 236,889 | -12,5 | +80,4 | +57,9 |
| 2 | 270,609 | 241,987 | -10,6 | +80,4 | +61,3 |
| 3 | 262,733 | 234,6 | -10,7 | +75,2 | +56,4 |
| 4 | 271,232 | 242,579 | -10,6 | +80,8 | +61,7 |
| 5 | 270,077 | 245,012 | -9,3 | +80,1 | +63,3 |
| 6 | 262,027 | 245,551 | -6,3 | +74,7 | +63,7 |
| 7 | 264,394 | 235,656 | -10,9 | +76,3 | +57,1 |
| 8 | 264,727 | 241,396 | -8,8 | +76,5 | +60,9 |
| 9 | 257,381 | 235,591 | -8,5 | +71,6 | +57,1 |
| Среднее значение | 265,976 | 239,918 | -9,8 | +77,3 | +59,9 |

Знаком «+» указано превышение относительно максимально допустимой деформации $S_u=150\text{мм}$ (%); знаком «-» – снижение осадок фундамента в зависимости от варианта

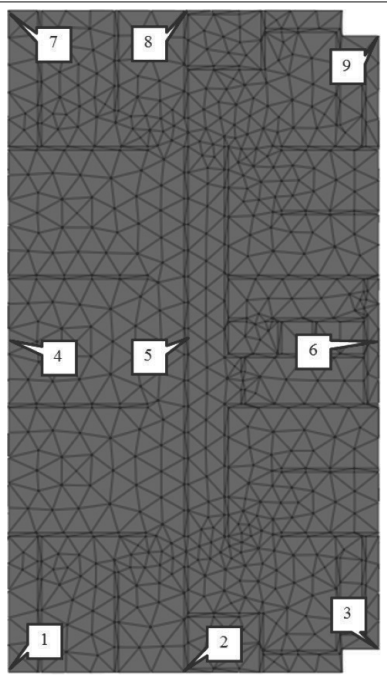


Рис. 4. Схема расположения анализируемых точек

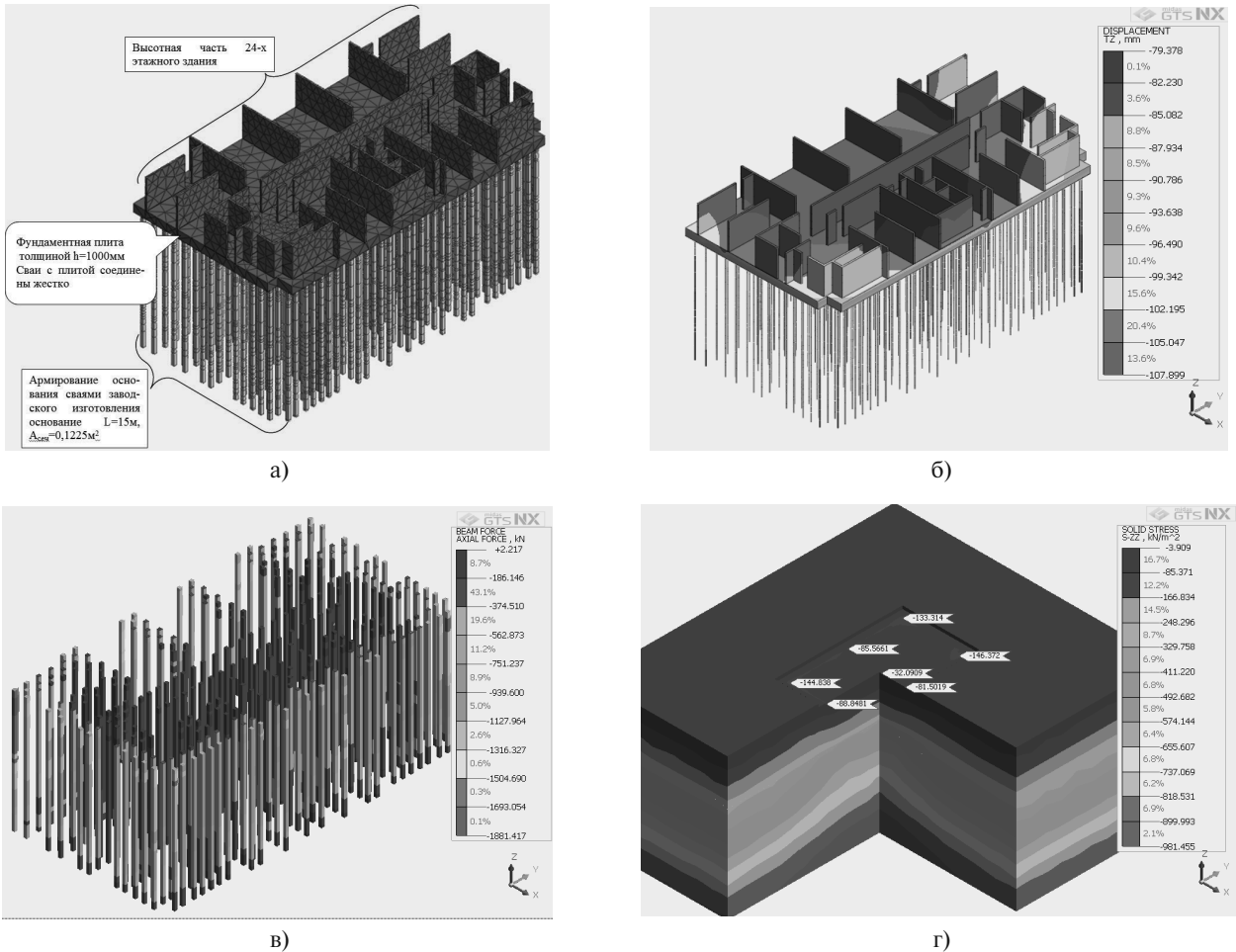


Рис. 5. а) Общий вид свайно-плитного фундамента; б) Осадки свайно-плитного фундамента; в) Вертикальные усилия в сваях; г) Вертикальные напряжения в грунтовом массиве вдоль оси Z

свайный фундамент с промежуточной подушкой [3] или плитный фундамент на армированном основании (СФПП). Параметры данного решения были назначены таким же образом, как и для свайного варианта фундамента (см. рис. 6а), но несущая способность сваи определялась с учетом рекомендаций [3,4] и составила 1560кН. Данное решение отличается от предыдущего тем, что между фундаментом и сваями нет конструктивной связи, между оголовками свай и плитным ростверком расположена промежуточная подушка из малосжимаемого материала, позволяющая при сейсмическом воздействии существенно снизить горизонтальные усилия, возникающие в сваях.

В результате расчетов, проведенных по данному варианту, удалось установить, что прогнозная максимальная осадка здания составит около 125 мм

(см. рис. 6б), что на 56,6% ниже, чем при использовании плитного варианта.

Также было отмечено, что средняя нагрузка на сваю уменьшается до 580,3 кН (см. рис. 6в), а доля воспринятой сваями нагрузки составит 65,5%. Данный факт говорит о перераспределении нагрузок, передаваемых на основание, между фундаментной плитой и свайным основанием. В данном случае такое перераспределение позволяет более полно использовать несущую способность плитного ростверка, что подтверждается изополями напряжений в вертикальном направлении, представленными на рисунке 6г.

Для окончательного выбора рационального варианта фундамента для данного здания было решено выполнить сравнение полученных результатов (усилий в сваях и деформаций основания) в табличном виде (см. табл. 3).

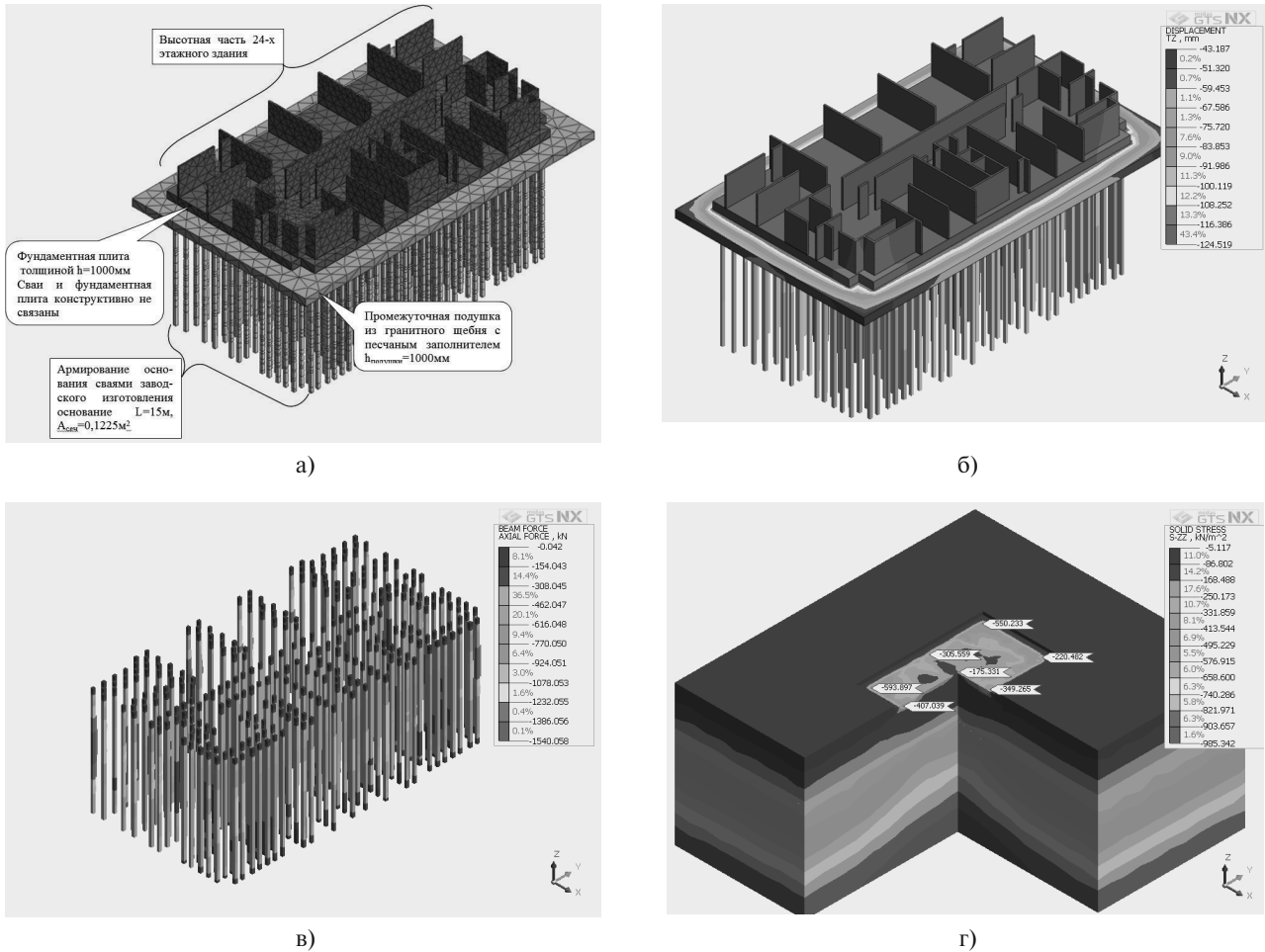


Рис. 6. а) Общий вид свайного фундамента с промежуточной подушкой; б) Осадки свайного фундамента с промежуточной подушкой; в) Вертикальные усилия в элементах армирования; г) Вертикальные напряжения в грунтовом массиве вдоль оси Z

Таблица 3

Сравнение выявленных результатов по вариантам фундаментов глубокого заложения

| Сравниваемые показатели фундаментов | | СПФ | СФПП | $\Delta = \frac{СПФ - СФПП}{СПФ}, \%$ |
|--|----|------|------|---------------------------------------|
| Осадка S_{max} , мм | | 107 | 125 | -16,8 |
| Вертикальные усилия в сваях F_{dmax} , кН | | 1800 | 1540 | +14,4 |
| Горизонтальные усилия в уровне оголовков свай Q , кН | OY | 12,5 | 9,6 | +23,2 |
| | OX | 52,6 | 16,4 | +68,8 |
| Моменты в уровне оголовков M_s , кН*м | OY | 63,4 | 27,7 | +56,3 |
| | OX | 19,1 | 17,4 | +8,9 |

Из табл. 3 видно, что значения усилий в свайном варианте фундамента значительно выше аналогичных значений для плитного фундамента на армированном основании. При этом пиковое значение вертикального усилия превышает расчетную несущую

способность сваи для свайного варианта (см. рис. 5в). Полученные значения горизонтальных сил и моментов при проверке устойчивости основания, окружающего сваю, превышают допустимые значения.

Основные выводы

После проведения численных экспериментов для высотного здания, возводимого на слабых глинистых грунтах, были сделаны следующие выводы:

1. Применение плитного фундамента с заменой просадочных грунтов на более прочные непросадочные не обеспечивает нормативные деформации;

2. Использование традиционного свайно-плитного фундамента позволяет снизить осадки за счет передачи большей части нагрузки на прочные и малосжимаемые песчаные грунты ИГЭ-7. Однако в ходе расчетов установленные значения горизонтальных сил и моментов в оголовках свай вызвали

напряжения на боковой поверхности свай, превышающие значение прочности грунта, окружающего сваю;

3. Предлагаемый вариант армирования основания жесткими вертикальными элементами позволил не только снизить деформации основания, но и распределить вес здания между фундаментной плитой и массивом армированного основания более рационально. При этом напряжения, возникающие на боковой поверхности элементов армирования основания, находятся в пределах допустимых значений и не превышающих прочности грунта, окружающего армоэлемент (сваю).

Литература

1. СП 24.13330.2011. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85*. Свайные фундаменты/ НИИОСП им. Н.М. Герсеванова. -М.: Минстрой, 2011. – 90 с.
2. СП 14.13330.2011. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*. Строительство в сейсмических районах/ (ЦНИИСК им.В.А.Кучеренко). – М.: Минстрой России, 2011. – 159 с.
3. Основания, фундаменты и подземные сооружения: Справочник проектировщика/ М.И. Горбунов-Посадов, В.А. Ильичев, В.И. Крутов и др.; Под общ. ред. Е.А. Сорочана и Ю.Г. Трофименкова. – М.:Стройиздат, 1985.- 480 с.
4. Руководство по проектированию свайных фундаментов/ НИИОСП им. Н.М. Герсеванова. -М.:Стройиздат, 1980. – 152 с.
5. СП 50-102-2003. Проектирование и устройство свайных фундаментов – М.: Минстрой России, 2004. – 94 с.

References

1. JV 24.13330.2011. Revised edition of SNIIP 2.02.03-85*. Pile foundations. NIIOSP named of N.M.Gersevanova. Moscow, Minstroy Publ, 2011, 90 p.
2. JV 14.13330.2011. Actualized edition of SNIIP II-7-81*. Construction in seismic regions/ (tsniisk named of And. Kucherenko). Moscow, Minstroy Russia Publ, 2011, 159 p.
3. Osnovania, fundamenti i podzemnie sooruzhenia [The bases, foundations and underground structures: designer's manual]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1985, 480 p.
4. Manual for the design of pile foundations. NIIOSP named of Gersevanova. Moscow, Stroyizdat Publ., 1980, 152 p.
5. JV 50-102-2003. Design and installation of pile foundations. Moscow, Minstroy Russia, 2004, 94 p.