

УДК 681.3.06:624.131

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ АРМИРОВАННЫХ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ ФУНДАМЕНТОВ ЗДАНИЙ

В.Е. Быховцев, Д.В. Прокопенко, С.В. Торгонская

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель

MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELLING OF THE BEARING ABILITY OF THE REINFORCED SOIL BASES OF THE BASES OF BUILDINGS

V.E. Bykhoutsev, D.V. Prokopenko, S.V. Torgonskaya

F. Scorina Gomel State University, Gomel

В работе рассматривается несущая способность грунтового основания плитного фундамента, имеющего включение малопрочного грунта, упрочненного винтовыми сваями малого сечения. Для исследования несущей способности был использован программный комплекс «Энергия 3D».

Ключевые слова: плитный фундамент, математическая модель, винтовая свая, компьютерное моделирование, несущая способность.

The paper deals with the analysis of the bearing ability of the soil basis slab the base which has the inclusion of the weak ground strengthened by screw piles of small section. For research of the bearing ability the program complex «Energy 3D» was used.

Keywords: slab foundation, computer modelling, mathematical model, screw pile, bearing ability.

Введение

В природе грунты представляют собой сложные многофазные системы, элементами которых являются различные структурные элементы: слои, линзы, вклинивания. Верхний слой природных грунтов представляет собой органоминеральное образование – почву. К этой же категории грунтов относятся илы, торф и т. п., которые могут находиться на поверхности грунтовой толщи и внутри ее, что является осложняющим фактором при оценке грунтов как оснований фундаментов [1]. В настоящее время все чаще под застройку отводятся площадки, которые в своей структуре имеют включение малопрочного грунта, что значительно снижает несущую способность грунта как основания фундамента возводимого здания. Несущая способность таких грунтовых оснований приводит к необходимости устройства сложных фундаментов зданий, что сопряжено со значительным увеличением стоимости одного квадратного метра возводимого здания. Решением этой проблемы может быть локальное повышение несущей способности малопрочных зон грунтового основания. В этом случае экономический эффект устройства фундаментов здания может достигать 20% их общей стоимости.

Существует несколько конструктивных методов, позволяющих увеличить несущую способность грунтовых оснований, в том числе содержащих малопрочные включения. Одним из

таких методов является вертикальное и горизонтальное армирование грунта. В настоящей работе рассматривается армирование грунта вертикальными сваями. Ставится задача определения количества, размеров и физико-механических характеристик армирующих элементов малопрочных зон грунтовых оснований. В формализованной постановке данная задача является многокритериальной краевой задачей нелинейной математической физики. Наиболее эффективным методом решения указанной задачи является метод объектно-ориентированного компьютерного моделирования на основе системного подхода и метода конечных элементов, рассмотренного совместно с методом энергетической линеаризации [2], [3], [4].

1 Постановка задачи

Рассматривается плитный фундамент на сложном нелинейно-деформируемом грунтовом основании. На верхнюю плоскость фундаментной плиты действует нормальная внешняя нагрузка. На некотором расстоянии от контактной поверхности плитного фундамента находится включение малопрочного грунта. С целью повышения несущей способности грунтового основания фундамента малопрочное грунтовое включение армируется винтовыми сваями малого сечения. Необходимо разработать численный метод расчёта упрочнения малопрочных грунтов под плитные фундаменты методом вертикального армирования сваями малого сечения.

В настоящей работе для исследования указанной нелинейной физической системы использовался программный комплекс «Энергия 3D», разработанный на основе метода конечных элементов и метода энергетической линеаризации [2].

2 Математическая модель системы

Всякая реальная система или объект всегда имеют определенные связи с внешней средой, которая налагает свои условия на их существование и функционирование. Все эти и другие качества в математической модели должны иметь своё отображение, а это значит, что математическая модель может иметь свою структурную схему. Это сразу накладывает свои требования на структуру ядра математической модели. Ядро математической модели будем строить на основе принципа минимума полной энергии системы. Для краевых задач нелинейной механики грунтов математическая модель исследуемой физической системы будет иметь вид [2], [3]:

1. Геометрическая модель деформируемой среды.

2. Механико-математическая модель элементов системы при линейно-упругом деформировании $\sigma_i = E\varepsilon_i$; при нелинейно-упругом деформировании $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$, в частности

$$\sigma_i = A\varepsilon_i^m, \quad A > 0, \quad 0 < m < 1,$$

где σ_i, ε_i – интенсивности напряжений и деформаций, E – модуль деформации, A, m – параметры закона нелинейного деформирования.

3. Система краевых условий задаётся в соответствии с классификацией поставленной задачи как краевой задачи математической физики.

4. Условия равновесия системы (ядро математической модели):

$$\frac{\delta \Pi}{\delta \{U\}} = 0,$$

$$\text{где } \Pi = \frac{1}{2} \int_V \{\varepsilon\}^T \{\sigma\} dV - \{U\}^T \{P\},$$

$\Pi, \{P\}$ – полная энергия деформируемой системы и вектор внешних сил, $\{\sigma\}, \{\varepsilon\}, \{U\}$ – векторы напряжений, деформаций и перемещений, V – объём области существования исследуемой системы.

5. Математическая модель (форма) искомого решения: $\varphi = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 y + \alpha_3 z$.

В работе для исследования математической модели нелинейной физической системы используется аналитический метод энергетической линеаризации. Сущность метода состоит в построении секущего модуля деформации для каждого конечного элемента, что в целом сводится к решению неоднородной линейной системы, эквивалентной по несущей способности исходной задачи [2], [3].

3 Аналитический метод определения оптимального армирования сваями малого сечения грунтовых оснований, содержащих грунты пониженной несущей способности

Из физического анализа рассматриваемого класса задач следует, что несущая способность грунтового основания, содержащего малопрочные включения, будет зависеть от метрических и физико-механических параметров слоя пониженной несущей способности. При компьютерном объектно-ориентированном моделировании задач указанного класса в каждом частном случае определяется область существования исследуемой системы, в структуре этой области выделяется подобласть, содержащая малопрочные грунты. Подобласть с малопрочным грунтом армируется вертикальными сваями малого сечения. Количество этих свай, их геометрические и физические характеристики подлежат определению. Дискретизация всей области может быть своя, способ задания граничных условий и физико-механические характеристики элементов дискретизованной области определяются на основании экспериментальных данных. Следовательно, дискретизованная область по своей структуре и свойствам будет неоднородная и нелинейно деформируемая. В такой постановке решение этой задачи возможно только посредством компьютерного моделирования. Однако для оперативного принятия решения для задач данного класса получение приближённого аналитического решения представляет значительный интерес. Авторами разработан подход для получения приближённого аналитического решения поставленной задачи. Принципиальная сущность разработанной методики состоит в построении однородного гипотетического грунтового основания для подобласти малопрочного грунта, эквивалентного по своей несущей способности реальному основанию плитных фундаментов. Это значит, что средневзвешенное значение модуля деформации для армированной подобласти малопрочного грунта, расположенной в плане проекции фундаментной плиты, должно быть не меньше модуля деформации основной области грунтового основания. На основе результатов компьютерного моделирования реальных задач об осадке плитных фундаментов на основаниях с малопрочными грунтами были определены необходимые данные для их достаточного армирования и построены аналитические соотношения для определения количества армирующих свай, их геометрических и физических характеристик. Исходя из того, что площадь пятна застройки может определяться десятками квадратных метров, аналитические выкладки целесообразно проводить для небольшой площадки, расположенной в плане проекции фундаментной плиты. В общем случае рассматривается выделенный объём малопрочного грунта: $V = Sh$, где S – площадь горизонтальной площадки выделенного

объёма малопрочного грунта, h – высота слоя малопрочного грунта, E_{cl} – модуль деформации слоя малопрочного грунта. Для армированного выделенного объёма малопрочного слоя грунта при условии эквивалентности его по несущей способности реальному основанию плитного фундамента будет иметь место следующее соотношение:

$$(V - nV_{cs})E_{cl} + nV_{cs}E_{cs} = E_0V, \quad (3.1)$$

где n – количество армирующих свай для выделенного объёма малопрочного грунта, V_{cs}, E_{cs} – объём и модуль деформации армирующей сваи, E_0 – модуль деформации грунтового основания плитного фундамента.

Длина армирующих свай принимается равной мощности слоя малопрочного грунта, тогда из (3.1) следует

$$(S - nd^2)E_{cl} + nd^2E_{cs} = E_0S. \quad (3.2)$$

Из (3.2) следует

$$n = \frac{(E_0 - E_{cl})S}{d^2(E_{cs} - E_{cl})} \quad (3.3)$$

или

$$E_{cs} = \frac{(E_0 - E_{cl})S}{nd^2} + E_{cl}. \quad (3.4)$$

Полученные формулы были верифицированы методом компьютерного моделирования и этим самым была показана их практическая приемлемость для экспресс оценки способа армирования слоя малопрочного грунта грунтового основания плитного фундамента. Однако следует иметь в виду, что наиболее точное решение поставленной задачи может быть получено только методом компьютерного объектно-ориентированного моделирования неоднородных и нелинейных систем деформируемых твёрдых тел.

4 Компьютерное моделирование упрочнения малопрочных грунтов под плитные фундаменты методом вертикального армирования сваями малого сечения

Для исследования поставленной задачи нам необходимо рассмотреть фундаментную плиту в однородном грунтовом основании – это будет базовая задача. На ее основе рассмотрим задачи для исследования упрочнения малопрочных грунтов методом вертикального армирования сваями малого сечения. Все задачи рассматривались в трехмерном пространстве, их исследование проводилось методом визуального объектно-ориентированного моделирования на основе метода конечных элементов и метода энергетической линеаризации. Площадки под застройку по своей протяженности могут быть довольно большими, поэтому для исследования выделим некоторую площадку, содержащую малопрочное включение. Армирование будем строить по симметричной схеме, что позволит нам увеличить объемы рас-

четной области. В силу симметрии рассматриваемых задач (рисунок 4.1), их численное решение производилось для одной четверти деформируемой области со схемой дискретизации, приведенной на рисунке 4.2.

Для получения решения методом компьютерного объектно-ориентированного моделирования было построено 146 модельных задач. Все модельные задачи рассматриваются в одной и той же дискретизованной области. Свойства элементов модели определяются содержанием для каждой конкретной задачи. Во второй модельной задаче несущая способность фундаментной плиты рассматривалась с учетом и без учета уплотнения грунта вокруг ствола армирующих свай.

Модельная задача № 1 (Плитный фундамент – базовая задача).

Исходные данные: векторы шагов дискретизации

$$h_x = \{30, 30, 30, 20, 30, 10, 30, 30, 10, 30, 10, 30, 20, 30, 30, 30\},$$

$$h_y = \{30, 30, 30, 20, 30, 10, 30, 10, 30, 30, 10, 30, 10, 30, 20, 30, 30\},$$

$$h_z = \{20, 10, 10, 10, 10, 30, 30, 30, 30, 30, 10, 30, 30, 30\};$$

$$E_{cp} = 32 \text{ МПа}, \mu_{cp} = 0.3,$$

$$E_{nl} = 20000 \text{ МПа}, \mu_{nl} = 0.15,$$

расчётная область: $440 \times 440 \times 370$ см;

плита: $220 \times 220 \times 20$ см;

нагрузка $P = 1280$ кН (128000 кгс).

Модельная задача № 2 (Плитный фундамент в грунтовом основании с включением малопрочного грунта).

Исходные данные: векторы шагов дискретизации

$$h_x = \{30, 30, 30, 20, 30, 10, 30, 10, 30, 30, 10, 30, 10, 30, 20, 30, 30\},$$

$$h_y = \{30, 30, 30, 20, 30, 10, 30, 10, 30, 30, 10, 30, 10, 30, 20, 30, 30\},$$

$$h_z = \{20, 10, 10, 10, 10, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30\};$$

$$E_{cp} = 32 \text{ МПа}, \mu_{cp} = 0.3,$$

$$E_{nl} = 20000 \text{ МПа}, E_{1cl} = 2 \text{ МПа},$$

$$E_{2cl} = 8 \text{ МПа}, E_{cs} = 500 - 20000 \text{ МПа},$$

$$\mu_{nl} = 0.15, P = 1280 \text{ кН (128000 кгс)};$$

расчётная область: $440 \times 440 \times 370$ см;

малопрочный слой: $240 \times 240 \times 180$ см;

плита: $220 \times 220 \times 20$ см;

свая: $10 \times 10 \times 180$ см.

Проанализировав полученные методом компьютерного моделирования, данные в модельных задачах 1, 2, можно сделать выводы:

1. Учет уплотнения вокруг армирующих свай незначительно влияет на осадку фундаментной плиты (при $E_{2cl} = 2$ МПа уплотнение увеличивает в среднем несущую способность грунтового основания на 0,29%, при $E_{2cl} = 8$ МПа – на 0,6%).

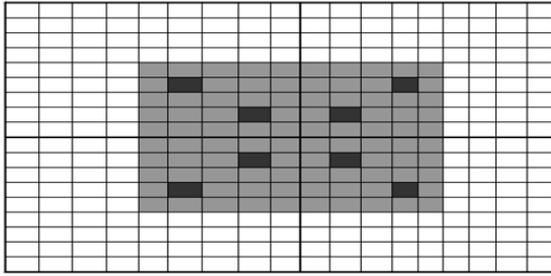


Рисунок 4.1 – Схема армирования малопрочного грунта (вид сверху)

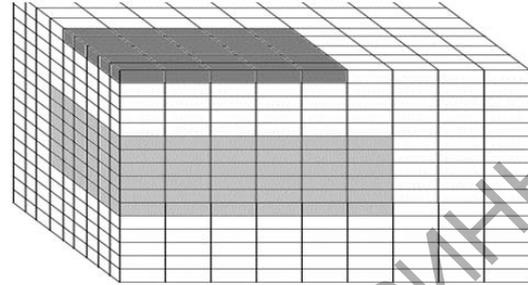


Рисунок 4.2 – Дискретизация 1/4 расчётной области фундамента на сложном основании

Таблица 4.1 – Осадка плитного фундамента без учета и с учетом малопрочного слоя при линейном и нелинейном деформировании (см)

№ узлов	Плитный фундамент $E_{1сг} = 8$				Плитный фундамент $E_{2сг} = 2$			
	Линейное решение		Нелинейное решение		Линейное решение		Нелинейное решение	
	Сл. слой	Без сл. слоя	Сл. слой	Без сл. слоя	Сл. слой	Без сл. слоя	Сл. слой	Без сл. слоя
1	3,21	2,25	7,87	6,95	3,95	2,25	8,38	6,95
2	3,21	2,25	7,87	6,95	3,94	2,25	8,37	6,95
3	3,20	2,24	7,86	6,94	3,94	2,24	8,36	6,94
4	3,16	2,21	7,82	6,91	3,89	2,21	8,31	6,91
5	3,14	2,20	7,8	6,89	3,87	2,20	8,29	6,89
6	3,08	2,15	7,73	6,83	3,80	2,15	8,21	6,83

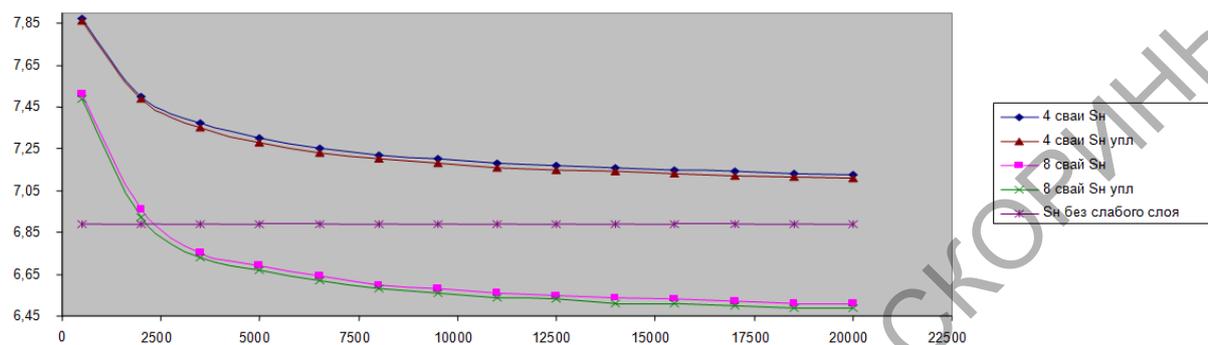
Таблица 4.2 – Осадки фундаментной плиты в зависимости от модуля упругости материала армирующих свай при модуле деформации малопрочного грунта $E_{2сг}=2$ МПа (см)

$S_{пл} E_{сг}$	500	2000	3500	5000	6500	8000	9500	11000	12500	14000	15500	17000	18500	20000
Четыре сваи														
S_l	3,65	3,28	3,23	3,17	3,09	3,1	3,08	3,07	3,06	3,05	3,04	3,03	3,02	3,02
S_n	7,87	7,5	7,37	7,3	7,25	7,22	7,2	7,18	7,17	7,16	7,15	7,14	7,13	7,13
$S_{л упл}$	3,61	3,32	3,2	3,14	3,1	3,07	3,06	3,04	3,03	3,03	3,02	3,01	3,01	3
$S_{н упл}$	7,86	7,49	7,35	7,28	7,23	7,2	7,18	7,16	7,15	7,14	7,13	7,12	7,12	7,11
Восемь свай														
S_l	3,42	2,96	2,78	2,7	2,65	2,62	2,59	2,57	2,56	2,55	2,54	2,54	2,53	2,52
S_n	7,51	6,96	6,75	6,69	6,64	6,6	6,58	6,56	6,55	6,54	6,53	6,52	6,51	6,51
$S_{л упл}$	3,36	2,92	2,76	2,68	2,63	2,59	2,57	2,55	2,54	2,53	2,52	2,51	2,5	2,5
$S_{н упл}$	7,49	6,92	6,78	6,67	6,62	6,58	6,56	6,54	6,53	6,51	6,51	6,5	6,49	6,49

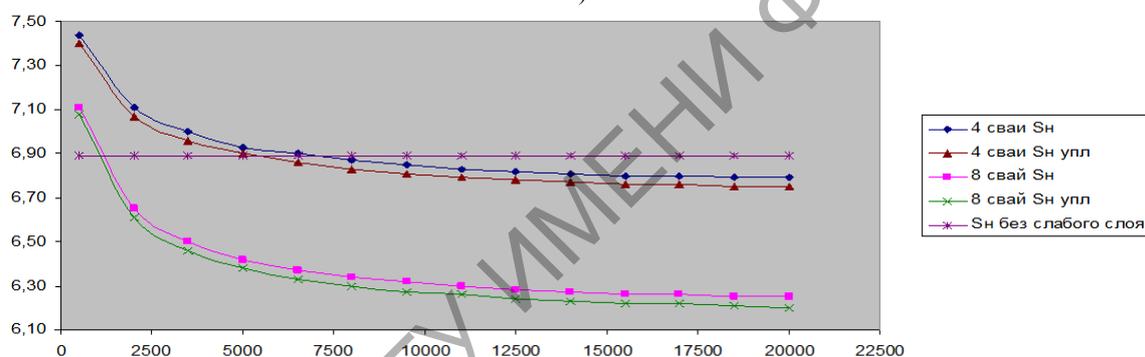
Таблица 4.3 – Осадки фундаментной плиты в зависимости от модуля упругости материала армирующих свай при модуле деформации малопрочного грунта $E_{2сг}=8$ МПа (см)

$S_{пл} E_{сг}$	500	2000	3500	5000	6500	8000	9500	11000	12500	14000	15500	17000	18500	20000
Четыре сваи														
S_l	3,03	2,83	2,75	2,7	2,67	2,65	2,64	2,63	2,62	2,61	2,6	2,6	2,59	2,59
S_n	7,44	7,11	7	6,93	6,9	6,87	6,85	6,83	6,82	6,81	6,8	6,8	6,79	6,79
$S_{л упл}$	2,96	2,79	2,7	2,66	2,63	2,61	2,59	2,58	2,57	2,56	2,56	2,55	2,55	2,54
$S_{н упл}$	7,4	7,07	6,96	6,9	6,86	6,83	6,81	6,79	6,78	6,77	6,76	6,76	6,75	6,75
Восемь свай														
S_l	2,88	2,56	2,44	2,38	2,34	2,31	2,29	2,28	2,27	2,26	2,25	2,24	2,24	2,23
S_n	7,11	6,65	6,5	6,42	6,37	6,34	6,32	6,3	6,28	6,27	6,26	6,26	6,25	6,25
$S_{л упл}$	2,8	2,51	2,39	2,33	2,29	2,27	2,25	2,23	2,22	2,21	2,2	2,2	2,19	2,19
$S_{н упл}$	7,08	6,61	6,46	6,38	6,33	6,3	6,27	6,26	6,24	6,23	6,22	6,22	6,21	6,2

$S_{л}, S_{н}$ – осадки фундаментной плиты при линейном и нелинейном деформировании основания без учета уплотнения грунта вокруг армирующих винтовых свай, $S_{л\text{упл}}, S_{н\text{упл}}$ – осадки фундаментной плиты при линейном и нелинейном деформировании основания с учетом уплотнения грунта вокруг армирующих винтовых свай.



а)



б)

Рисунок 4.3 – График зависимости осадки фундаментной плиты при нелинейном деформировании от модуля упругости материала армирующих свай а) при модуле деформации малопрочного грунта $E_{2ср}=2$, б) при модуле деформации малопрочного грунта $E_{2ср}=8$

2. Чем больше модуль деформации малопрочного грунта, тем больше влияние уплотнения грунта вокруг армирующих винтовых свай на осадку фундаментной плиты (с увеличением модуля деформации малопрочного грунта увеличивается несущая способность грунтового основания).

3. При модуле деформации малопрочного грунта $E_{2ср}=2$ МПа четырех армирующих свай недостаточно для того, чтобы добиться несущей способности грунтового основания с включением малопрочного грунта, равной несущей способности грунтового основания без малопрочного включения.

4. При модуле деформации малопрочного грунта $E_{2ср}=8$ МПа достаточно четырех армирующих свай для того, чтобы добиться несущей способности грунтового основания с включением малопрочного грунта, равной несущей способности грунтового основания без малопрочного включения.

5. При модуле деформации малопрочного грунта $E_{2ср}=8$ МПа армирование можно произвести четырьмя сваями с модулем упругости

$E=6500$ МПа или восемью сваями с модулем упругости $E=2000$ МПа, чтобы добиться несущей способности грунтового основания с включением малопрочного грунта, равной несущей способности грунтового основания без малопрочного включения.

6. Как видно из рисунка 4.3, армирование можно производить сваями малого сечения с модулем упругости, рассчитанным по формуле (3.4), для того чтобы добиться несущей способности грунтового основания с включением малопрочного грунта, равной несущей способности грунтового основания без малопрочного включения.

Представляет интерес, как будет вести себя армирование малопрочного грунтового включения сваями малого сечения при различных модулях деформации малопрочного грунтового основания. Для этого были построены модельные задачи 3, 4.

В ниже приведенных модельных задачах модуль упругости материала армирующих свай рассчитывался по формуле (3.4).

Модельная задача № 3 (Плитный фундамент – базовая задача).

Исходные данные: векторы шагов дискретизации

$$h_x = \{30, 150, 150, 150, 10, 10, 50, 10, 25, 25, 10, 50, 10, 10, 150, 150, 150, 30\},$$

$$h_y = \{30, 150, 150, 150, 10, 10, 50, 10, 25, 25, 10, 50, 10, 10, 150, 150, 150, 30\},$$

$$h_z = \{20, 30, 30, 30, 40, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 10, 30, 30, 30, 30\};$$

$$E_{zp} = 32 \text{ МПа}, \mu_{zp} = 0.3,$$

$$E_{nl} = 20000 \text{ МПа}, \mu_{nl} = 0.15,$$

расчётная область: $1140 \times 1140 \times 460$ см;

плита: $170 \times 170 \times 20$ см;

нагрузка $P = 1280$ кН (128000 кгс).

Модельная задача № 4 (Плитный фундамент в грунтовом основании с включением малопрочного грунта).

Исходные данные: векторы шагов дискретизации

$$h_x = \{30, 150, 150, 150, 10, 10, 50, 10, 25, 25, 10, 50, 10, 10, 150, 150, 150, 30\},$$

$$h_y = \{30, 150, 150, 150, 10, 10, 50, 10, 25, 25, 10, 50, 10, 10, 150, 150, 150, 30\},$$

$$h_z = \{20, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30\};$$

$$E_{zp} = 35 \text{ МПа}, \mu_{zp} = 0.3,$$

$$E_{nl} = 20000 \text{ МПа}, E_{cl} = 1-10 \text{ МПа},$$

$$E_{ce} = 9847 \text{ МПа},$$

$$\mu_{nl} = 0.15, P = 1280 \text{ кН (128000 кгс)};$$

расчётная область: $1140 \times 1140 \times 460$ см;

малопрочный слой: $810 \times 810 \times 180$ см;

плита: $170 \times 170 \times 20$ см;

свая: $10 \times 10 \times 180$ см.

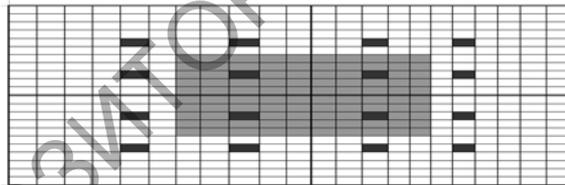


Рисунок 4.4 – Расчётная область с планом армирования сваями (вид сверху)

Осадка плиты базовой задачи равна 1,36 и 5,2 см при линейном и нелинейном деформировании соответственно.

Таблица 4.4 – Осадки фундаментной плиты в зависимости от модуля упругости малопрочного слоя (см)

$S_{nl} \backslash E_{cl}$	1	2	4	6	8	10
S_l	4,66	3,84	2,74	2,39	2,05	1,91
S_n	15,86	12,33	9,84	8,53	7,75	7,13
$S_{l \text{ арм}}$	1,34	1,34	1,3	1,27	1,26	1,25
$S_{n \text{ арм}}$	4,87	4,87	4,82	4,73	4,73	4,67

S_l, S_n – осадки фундаментной плиты при линейном и нелинейном деформировании основания без армирования малопрочного грунта сваями,

$S_{l \text{ арм}}, S_{n \text{ арм}}$ – осадки фундаментной плиты при линейном и нелинейном деформировании основания с учетом армирования малопрочного грунта сваями.

По результатам компьютерного моделирования, полученным в модельных задачах 3–4, можно сделать вывод, что вне зависимости от модуля упругости малопрочного слоя армирование достаточно производить под плитой и на расстоянии 10 см в горизонтальной плоскости от края проекции плиты, для того чтобы добиться несущей способности грунтового основания с включением малопрочного грунта большей несущей способности грунтового основания без малопрочного включения.

В следующих модельных задачах рассматривается армирование малопрочного включения в зависимости от расстояния этого включения в вертикальной плоскости от контактной поверхности фундаментной плиты с грунтовым основанием.

Модельная задача № 5 (Плитный фундамент – базовая задача).

Исходные данные: векторы шагов дискретизации

$$h_x = \{30, 150, 150, 150, 10, 10, 50, 10, 25, 25, 10, 50, 10, 10, 150, 150, 150, 30\},$$

$$h_y = \{30, 150, 150, 150, 10, 10, 50, 10, 25, 25, 10, 50, 10, 10, 150, 150, 150, 30\},$$

$$h_z = \{20, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30\};$$

$$E_{zp} = 35 \text{ МПа}, \mu_{zp} = 0.3,$$

$$E_{nl} = 20000 \text{ МПа}, \mu_{nl} = 0.15,$$

расчётная область: $1140 \times 1140 \times 460$ см;

плита: $170 \times 170 \times 20$ см;

нагрузка $P = 1280$ кН (128000 кгс).

Модельная задача № 6 (Плитный фундамент в грунтовом основании с включением малопрочного грунта).

Исходные данные: векторы шагов дискретизации

$$h_x = \{30, 150, 150, 150, 10, 10, 50, 10, 25, 25, 10, 50, 10, 10, 150, 150, 150, 30\},$$

$$h_y = \{30, 150, 150, 150, 10, 10, 50, 10, 25, 25, 10, 50, 10, 10, 150, 150, 150, 30\},$$

$$h_z = \{20, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 30\};$$

$$E_{zp} = 35 \text{ МПа}, \mu_{zp} = 0.3,$$

$$E_{nl} = 20000 \text{ МПа}, E_{cl} = 5 \text{ МПа},$$

$$E_{ce} = 9847 \text{ МПа}, \mu_{nl} = 0.15,$$

$$P = 1280 \text{ кН (128000 кгс)};$$

расчётная область: $1140 \times 1140 \times 460$ см;

малопрочный слой: $810 \times 810 \times 150$ см;

плита: $170 \times 170 \times 20$ см;

свая: $10 \times 10 \times 150$ см.

Расчетная область с планом армирования сваями приведена на рисунке 4.4. Осадка базовой модели составляет 1,18 и 4,92 см. при линейном и нелинейном деформировании соответственно.

Таблица 4.5 – Осадки фундаментной плиты в зависимости от расстояния от контактной поверхности фундаментной плиты до малопрочного включения в вертикальной плоскости (см)

h	Осадки			
	Неармированный слабый грунт		Армированный слабый грунт	
	Линейное решение	Нелинейное решение	Линейное решение	Нелинейное решение
30	3,18	9,65	1,30	4,76
60	2,79	9,05	1,27	4,80
90	2,49	8,50	1,26	4,82
120	2,24	8,06	1,25	4,79
150	2,09	7,61	1,24	4,78
180	1,90	7,35	1,23	4,73
210	1,78	7,16	1,22	4,68
240	1,68	6,83	1,21	4,63
270	1,61	6,61	1,20	4,56
300	1,55	6,41	1,19	4,52

где h – расстояние от контактной поверхности фундаментной плиты до малопрочного включения в вертикальной плоскости.

По результатам компьютерного моделирования, полученным в модельных задачах 4–5, можно сделать вывод, что армирование малопрочного включения можно производить по выше изложенной формуле (3.4) вне зависимости от расстояния от контактной поверхности

фундаментной плиты до малопрочного включения, чтобы добиться несущей способности грунтового основания с малопрочным включением большей, чем несущая способность грунтового основания без малопрочного включения.

Заключение

Использование вертикального армирования зоны малопрочного грунтового основания сваями малого диаметра дает возможность обеспечить необходимую несущую способность слабых грунтов и осадку фундаментов. При этом, варьируя количеством, размерами и физико-механическими характеристиками армирующих элементов малопрочных зон грунтов, представляется возможным найти наиболее рациональные решения поставленной задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цытович, Н.А. Механика грунтов / Н.А. Цытович. – М. : Стройиздат, 1963. – 542 с.
2. Быховцев, В.Е. Компьютерное объектно-ориентированное моделирование нелинейных систем деформируемых твердых тел / В.Е. Быховцев. – Гомель : УО «ГГУ им. Ф. Скорины», 2007. – 219 с.
3. Быховцев, В.Е. Два эффективных метода решения краевых задач нелинейной теории упругости / В.Е. Быховцев. – Материалы, технологии, инструменты. – 2002. – № 4. – С. 5–7.
4. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М. : Мир, 1975. – 540 с.

Поступила в редакцию 24.01.13.