

УДК 581.3.06:624.131

Компьютерный анализ эффективности пакетного вертикального армирования грунтовых оснований плитных фундаментов

С.В. КИРГИНЦЕВА

Методом компьютерного моделирования исследуется эффективность использования пакетного вертикального армирования грунтовых оснований большеразмерных плитных фундаментов с целью повышения их несущей способности.

Ключевые слова: моделирование, плитный фундамент, грунты, несущая способность, пакетное вертикальное армирование.

The method of computer modeling investigates the efficiency of the reinforcing of the soil bases of large slab foundations for the purpose of increase their bearing ability.

Keywords: modeling, slabby base, the soil, bearing ability, batch vertical reinforcing.

Введение. Задача удешевления жилья всегда являлась очень актуальной. Вкладом в решение этой проблемы может быть использование рациональных конструкций фундаментов и подготовка грунтовых оснований фундаментов возводимых зданий и сооружений при условии обеспечения необходимой несущей способности грунтов: подсыпка, уплотнение, армирование грунтов [1], [2]. В данной работе рассматривается эффективность использования вертикального пакетного армирования грунтовых оснований плитных фундаментов с целью повышения несущей способности грунтов и, как следствие, удешевления стоимости фундаментов возводимых зданий. Пакет представляет некоторую подобласть грунта, содержащую горизонтальные и вертикальные армирующие элементы, а также грунт. Горизонтальными элементами являются армирующие материалы в виде пленок, полос из не гниющего и не поддающегося коррозии материала: стекловолокно, различные полимерные материалы, которые сверху и снизу ограничивают пакет. Внутри пакета на некотором расстоянии друг от друга расположены вертикальные сваи различных размеров и степени жесткости. Грунт внутри вертикального армирующего пакета может быть уплотнен. При этом степень уплотнения определяется расчетным или экспериментальным путем. Физико-механические характеристики элементов также могут быть определены расчетным методом или экспериментальным.

Фундамент, грунтовое основание и вертикальный армирующий пакет образуют единую сложную нелинейную физическую систему. Для исследования данной системы используется компьютерное объектно-ориентированное моделирование, в основе которого содержится понятие объекта системы, его свойств и связей; при этом используются методы математического и геометрического моделирования, объектно-ориентированное программирование и методы вычислительного эксперимента.

Общая постановка задачи. Рассмотрим задачу о взаимодействии большеразмерного плитного фундамента и армированного вертикальным пакетом нелинейно-деформируемого грунтового основания. В качестве базовой задачи рассмотрим задачу исследования деформирования однородного грунтового основания фундаментной плиты. Необходимо исследовать эффективность использования армирующего вертикального пакета в нелинейно-деформируемом грунтовом основании, а также влияние количества и физико-механических характеристик горизонтальных и вертикальных элементов армирующего пакета на осадку указанного типа фундамента. В формализованной постановке данная задача является третьей многокритериальной краевой задачей нелинейной математической физики (задача Дирихле-Неймана) [3].

Решение поставленной задачи было получено методом компьютерного моделирования на основе метода конечных элементов при использовании метода энергетической линеаризации с помощью программного комплекса «Энергия-3D» в линейной и нелинейной постановках [4], [5].

Математическая модель физической системы. Ядро математической модели строится на основе принципа минимума полной энергии системы. Для краевых задач нелинейной механики грунтов математическая модель исследуемой сложной нелинейной физической системы будет иметь вид [4]:

1. Геометрическая модель деформируемой среды.
2. Механико-математическая модель элементов системы
 - при линейно – упругом деформировании: $\sigma_i = E\varepsilon_i$,
 - при нелинейно – упругом деформировании: $\sigma_i = A\varepsilon_i^m$, $A > 0$, $0 < m < 1$,

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):

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

где $\Pi = \frac{1}{2} \int_V \{\varepsilon\}^T \{\sigma\} dV - \{U\}^T \{P\}$ – полная энергия деформируемой системы; $\{P\}$ – вектор внешних сил, $\{\sigma\}, \{\varepsilon\}, \{U\}$ – векторы напряжений, деформаций и перемещений, V – объём области существования исследуемой системы.

5. Математическая модель (форма) искомого решения:

$$\varphi = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 y + \alpha_3 z.$$

Компьютерное моделирование упрочнения грунтового основания большеразмерного плитного фундамента методом пакетного вертикального армирования и анализ результатов. Исследовано множество модельных задач в трехмерном пространстве в одной и той же дискретизованной области, в силу симметрии их численное решение проводилось для одной четверти деформируемой области. Размеры расчётной области определены на основании экспериментальных исследований: $790 \times 790 \times 250,6$ см.

Элементами рассматриваемой сложной нелинейной физической системы «Плитный фундамент – грунтовое основание» являются:

1. Прямоугольная фундаментная плита размерами $230 \times 230 \times 20$ см с характеристиками $E_{пл} = 20000$ МПа, $\mu_{пл} = 0,15$.
2. Однородное основание из минерального грунта с характеристиками $E_{гр} = 12$ МПа, $\mu_{гр} = 0,27$.
3. Армирующий вертикальный пакет, состоящий из армирующих горизонтальных пленок ($E_{пленок} = 100-3000$ МПа, $\mu_{пленок} = 0,2$), армирующих вертикальных свай ($E_{свай} = 1000-20000$ МПа, $\mu_{свай} = 0,3$) и уплотненного грунта внутри армирующего вертикального пакета. Степень уплотнения грунта принята равной $k_{упл} = 7$.

Схема дискретизации $\frac{1}{4}$ расчетной области плитного фундамента на армированном вертикальным пакетом грунтовом основании представлена на рисунке 1.

Осадка большеразмерной фундаментной плиты указанных размеров на однородном грунте составила 2,90 см и 5,46 см при линейном и нелинейном деформировании грунта соответственно.

Исследовалось влияние количества и физико-механических характеристик горизонтальных и вертикальных элементов армирующего вертикального пакета в грунтовом основании на осадку указанного типа фундамента. Результаты вычислений приведены в таблицах 1 и 2.

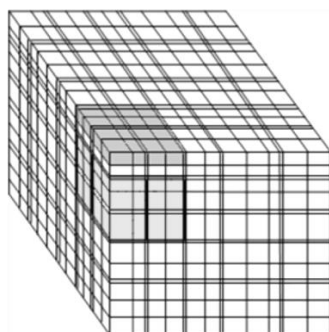


Рисунок 1 – Дискретизация $\frac{1}{4}$ расчетной области

В таблице 1 показаны осадки плитного фундамента на армируемом вертикальным пакетом грунтовым основании со следующими характеристиками армирующего пакета: глубина заложения пакета от поверхности плитного фундамента $h = 46$ см; длина горизонтальных пленок $l_{\text{пленок}} = 115$ см; толщина армирующего пакета $H = 100,6$ см; толщина армирующих пленок $h_{\text{пленок}} = 0,3$ см.

Данные таблицы 1 подтверждают неэффективность использования двух армирующих пленок в пакете: несущая способность однородного грунта повышается менее чем на 1 %. Однако уплотнив грунт внутри армирующего пакета из двух пленок в 7 раз, представляется возможным уменьшить осадку фундаментной плиты до 18 % при линейном деформировании и 15 % при нелинейном деформировании грунтового основания.

Использование в пакете одной, двух, трех или четырех армирующих вертикальных свай диаметром $d = 10$ см и длиной $l = 100$ см с модулем упругости материала свай $E_{\text{свай}} = 1000$ МПа позволит уменьшить осадку плиты до 12 % при линейном и нелинейном деформировании. Уплотнив при этом грунт внутри армирующего пакета, осадка плиты падает до 20 % и 18 % при линейном и нелинейном деформировании соответственно.

Таблица 1 – Осадки плитного фундамента на армированном грунтовым основании в зависимости от количества и физико-механических характеристик элементов вертикального армирующего пакета (см)

$E_{\text{пленок}}, \text{МПа}$		100								3000							
$d_{\text{свай}}, \text{см}$		10				15				10				15			
$E_{\text{свай}}, \text{МПа}$	S^{nl}	S^l	$S^l_{\text{упл}}$	S^H	$S^H_{\text{упл}}$	S^l	$S^l_{\text{упл}}$	S^H	$S^H_{\text{упл}}$	S^l	$S^l_{\text{упл}}$	S^H	$S^H_{\text{упл}}$	S^l	$S^l_{\text{упл}}$	S^H	$S^H_{\text{упл}}$
	$n_{\text{свай}}$																
Без свай		2,89	2,39	5,45	4,68	2,89	2,39	5,45	4,68	2,88	2,38	5,42	4,66	2,88	2,38	5,42	4,66
1000	1	2,80	2,38	5,29	4,65	2,72	2,37	5,15	4,61	2,77	2,37	5,20	4,62	2,70	2,36	5,08	4,58
	2	2,70	2,35	5,07	4,58	2,56	2,31	4,81	4,48	2,67	2,34	4,96	4,55	2,55	2,30	4,75	4,45
	3	2,63	2,35	4,94	4,55	2,48	2,31	4,66	4,44	2,60	2,33	4,83	4,51	2,46	2,28	4,61	4,39
	4	2,56	2,33	4,79	4,50	2,40	2,26	4,48	4,36	2,54	2,32	4,71	4,47	2,38	2,26	4,46	4,34
7000	1	2,70	2,36	5,19	4,61	2,62	2,34	5,05	4,56	2,67	2,35	5,08	4,57	2,60	2,33	4,97	4,52
	2	2,54	2,29	4,89	4,46	2,39	2,22	4,59	4,33	2,49	2,28	4,72	4,42	2,37	2,22	4,52	4,30
	3	2,46	2,28	4,79	4,43	2,32	2,22	4,48	4,29	2,41	2,25	4,61	4,37	2,28	2,18	4,38	4,24
	4	2,38	2,23	4,60	4,34	2,22	2,16	4,27	4,17	2,34	2,22	4,44	4,31	2,21	2,15	4,25	4,15
20000	1	2,68	2,35	5,17	4,60	2,60	2,32	5,02	4,53	2,64	2,34	5,04	4,55	2,58	2,31	4,95	4,49
	2	2,50	2,26	4,87	4,41	2,36	2,20	4,55	4,28	2,45	2,25	4,69	4,37	2,33	2,19	4,48	4,26
	3	2,43	2,25	4,75	4,39	2,29	2,19	4,45	4,25	2,37	2,22	4,57	4,32	2,26	2,16	4,34	4,20
	4	2,34	2,20	4,56	4,29	2,19	2,13	4,25	4,13	2,30	2,19	4,40	4,24	2,18	2,13	4,22	4,12

где $E_{\text{пленок}}$ – модуль упругости горизонтальных пленок в вертикальном армирующем пакете; $d_{\text{свай}}$, $E_{\text{свай}}$ и $n_{\text{свай}}$ – диаметр, модуль упругости и количество вертикальных свай в армирующем пакете соответственно; S^{nl} – осадка фундаментной плиты; S^l и S^H – осадки фундамента при линейном и нелинейном деформировании армированного вертикальным пакетом грунтового основания соответственно; $S^l_{\text{упл}}$ и $S^H_{\text{упл}}$ – осадки фундамента при линейном и нелинейном деформировании армированного вертикальным пакетом грунтового основания соответственно с учетом уплотнения грунта внутри вертикального армирующего пакета.

При использовании свай диаметром $d = 15$ см несущая способность грунта повышается до 17 % при линейном деформировании и 18 % при нелинейном деформировании грунта, а в случае уплотненного грунта внутри вертикального армирующего пакета – до 22 % и 20 % при линейном и нелинейном деформировании грунтового основания соответственно. Использовать более дорогой материал армирующих пленок не целесообразно, поскольку осадки фундамента практически не изменяются. Однако материал вертикальных свай в армирующем пакете играет значительную роль в уменьшении осадки плиты: различия в значениях осадок плитного фундамента достигают 10 %. Но ставится вопрос и экономической целесообразности использования

большого количества армирующих свай, изготовленных из более дорогого материала: значения осадок фундамента на грунтовом основании, армированном вертикальным пакетом со сваями с модулями упругости $E_{свай} = 7000$ МПа и $E_{свай} = 20000$ МПа, отличаются незначительно.

Исследовалось также влияние толщины вертикального армирующего пакета, наличия горизонтальных пленок в пакете, диаметра вертикальных свай, а также уплотнения грунта в пакете и физико-механических характеристик армирующих свай на несущую способность грунтового основания. В таблице 2 показаны осадки плитного фундамента на грунтовом основании, армированным вертикальным пакетом, расположенным в однородном грунте на той же глубине, длина пакета при этом не изменилась, толщина пакета возросла почти в 2 раза ($H = 200,6$ см). Модуль упругости горизонтальных элементов армирующего пакета принят равным $E_{пленок} = 3000$ МПа, количество вертикальных свай $n_{свай} = 2$.

Таблица 2 – Осадки плиты на армированном вертикальным пакетом грунтовом основании в зависимости от физико-механических характеристик элементов армирующего пакета и наличия армирующих пленок в пакете (см)

Армирующий пакет	С горизонтальными пленками								Без горизонтальных пленок							
	10				15				10				15			
$d_{свай}, см$																
S^{nl}	S^l	$S^l_{упл}$	S^H	$S^H_{упл}$	S^l	$S^l_{упл}$	S^H	$S^H_{упл}$	S^l	$S^l_{упл}$	S^H	$S^H_{упл}$	S^l	$S^l_{упл}$	S^H	$S^H_{упл}$
$E_{свай}, МПа$																
10000	2,57	2,05	4,67	4,01	2,37	2,00	4,30	3,86	2,59	2,06	4,76	4,04	2,39	2,01	4,35	3,89
15000	2,49	2,03	4,52	3,95	2,28	1,97	4,15	3,79	2,52	2,04	4,64	3,98	2,30	1,98	4,21	3,82
18642	2,45	2,02	4,45	3,92	2,24	1,95	4,08	3,76	2,48	2,03	4,57	3,95	2,26	1,96	4,14	3,78
20000	2,43	2,01	4,42	3,91	2,22	1,95	4,06	3,74	2,47	2,02	4,55	3,94	2,24	1,95	4,12	3,77
30000	2,35	1,99	4,30	3,85	2,15	1,91	3,96	3,69	2,39	2,00	4,45	3,89	2,17	1,92	4,03	3,71
35000	2,33	1,98	4,26	3,83	2,13	1,90	3,93	3,67	2,37	1,99	4,43	3,86	2,15	1,91	4,01	3,70
41945	2,29	1,97	4,21	3,81	2,10	1,89	3,90	3,64	2,34	1,98	4,39	3,84	2,13	1,89	3,98	3,67
45000	2,28	1,96	4,19	3,80	2,09	1,88	3,89	3,63	2,33	1,97	4,38	3,84	2,12	1,89	3,97	3,66
50000	2,27	1,95	4,18	3,78	2,08	1,87	3,88	3,61	2,32	1,96	4,37	3,83	2,10	1,88	3,97	3,64
70000	2,21	1,93	4,11	3,75	2,04	1,85	3,83	3,56	2,28	1,94	4,32	3,79	2,07	1,86	3,93	3,59
200000	2,20	1,87	3,99	3,63	1,97	1,80	3,75	3,47	2,19	1,88	4,25	3,67	2,01	1,81	3,86	3,49

Данные таблицы 2 показывают, что, увеличив толщину вертикального армирующего пакета почти в 2 раза, осадка плиты уменьшается до 32 % при линейном деформировании и 31 % при нелинейном деформировании грунтового основания, а в случае уплотненного грунта – до 38 % и 36 % при линейном и нелинейном деформировании соответственно. Следует отметить, что при использовании горизонтальных пленок в вертикальном армирующем пакете несущая способность грунта повышается незначительно.

При использовании двух свай диаметром $d = 10$ см в вертикальном армирующем пакете достаточно использовать материал свай с модулем упругости $E_{свай} = 4182$ МПа или двух вертикальных свай диаметром $d = 15$ см с модулем упругости материала свай $E_{свай} = 1859$ МПа. Это приведет к удешевлению стоимости подготовки грунтового основания плитного фундамента и повышению несущей способности грунта.

Результаты исследования влияния длины армирующего вертикального пакета в однородном грунте на осадку фундамента методом компьютерного моделирования представлены на рисунке 2. Приняты следующие характеристики уплотненного вертикального пакета: длина горизонтальных пленок $l_{пленок} = 115$ см, 230 см и 345 см; толщина армирующего пакета $H = 200,3$ см; толщина горизонтальных пленок $h_{пленок} = 0,3$ см; диаметр вертикальных свай $d = 15$ см; количество вертикальных свай $n_{свай} = 3$; модуль упругости горизонтальных элементов пакета $E_{пленок} = 3000$ МПа.

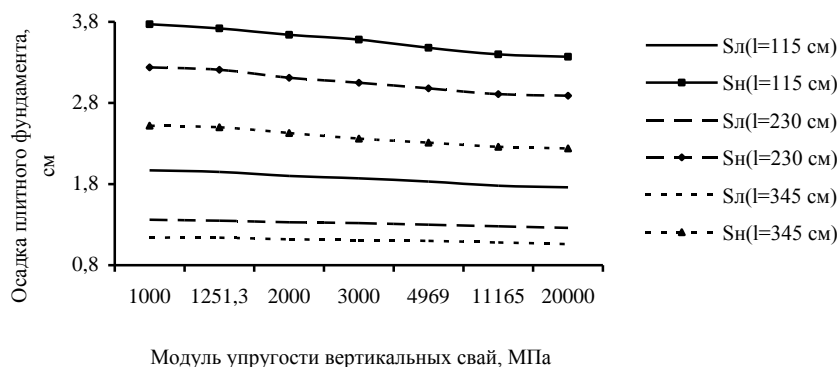


Рисунок 2 – График зависимости осадки плиты на армированном грунтовом основании от длины вертикального армирующего пакета

Данные рисунка 2 позволяют сделать вывод, что при использовании вертикального армирующего уплотненного пакета в однородном грунте длиной 115 см с тремя сваями, достаточно использовать материал свай с модулем упругости $E_{свай} = 1251,3$ МПа, осадка фундаментной плиты составляет 1,95 см при линейном деформировании и 3,72 см при нелинейном деформировании грунта. В случае, когда используется уплотненный вертикальный армирующий пакет длиной 230 см с тремя сваями, осадка плиты составляет 1,30 см и 2,98 см при линейном деформировании и нелинейном деформировании соответственно, при этом лучше использовать вертикальные сваи с модулем упругости $E_{свай} = 4969$ МПа. Увеличив длину армирующего пакета до 345 см с тремя вертикальными сваями, осадка фундамента уменьшается до 1,08 см и 2,26 см при линейном и нелинейном деформировании грунтового основания, в этом случае достаточно использовать материал свай с модулем упругости $E_{свай} = 11165,4$ МПа.

Заключение. Результаты компьютерного моделирования показали, что использование вертикального армирующего пакета в грунтовом основании высокоэффективно. При заданных условиях представляется возможным уменьшить осадку плитного фундамента до 32 % при линейном деформировании и 31 % при нелинейном деформировании грунта, а в случае уплотненного вертикального пакета – до 63 % и 59 % при линейном и нелинейном деформировании грунтового основания соответственно. Количество и физико-механические характеристики горизонтальных и вертикальных элементов вертикального армирующего пакета играют значительную роль в уменьшении осадки плитного фундамента на однородном грунтовом основании. При этом особое внимание следует уделить возможности удешевления материала элементов вертикального армирующего пакета.

Литература

1. Быховцев, В.Е. Численный анализ эффективности вертикального армирования структур грунтовых оснований фундаментов зданий / В.Е. Быховцев, Д.В. Прокопенко, С.В. Торгонская // Материалы, технологии, инструменты. – 2013. – Том 18, № 1. – С. 5–16.
2. Сеськов, В.Е., Быховцев, В.Е., Феофилов, Ю.В. Рекомендации по армированию песчаных намывных и насыпных оснований / В.Е. Сеськов, В.Е. Быховцев, Ю.В. Феофилов // Госстрой БССР, НИИС. – Мн., 1984. – 12 с.
3. Партон, В.З. Методы математической теории упругости / В.З. Партон, П.И. Перлин. – М. : Наука, 1981. – 688 с.
4. Быховцев, В.Е. Компьютерное объектно-ориентированное моделирование нелинейных систем деформируемых твёрдых тел / В.Е. Быховцев. – Гомель: УО «ГГУ им. Ф. Скорины», 2007. – 219 с.
5. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М. : Мир, 1975. – 540 с.