

Министерство образования и науки Российской Федерации
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Тамбовский государственный технический университет»

В.М. Антонов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АРМИРОВАННЫХ ОСНОВАНИЙ

Рекомендовано экспертной комиссией
при научно-техническом совете университета
в качестве монографии



Тамбов
Издательство ГОУ ВПО ТГТУ
2011

УДК 624.13
ББК 366
А724

Р е ц е н з е н т ы :

Доктор технических наук, советник РАН,
профессор ГОУ ВПО ТГТУ
В.В. Леденев

Доктор технических наук, профессор ГОУ ВПО ТГТУ
П.В. Монастырев

Антонов, В.М.

А724 Экспериментальные исследования армированных оснований :
монография / В.М. Антонов. – Тамбов : Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ,
2011. – 80 с. – 100 экз. – ISBN 978-5-8265-1006-3.

Работа посвящена исследованиям взаимодействия грунтовой матрицы и арматуры. В качестве засыпки использовались глинистые и песчаные грунты, а также многослойные основания и основания с включениями слабых прослоек и линз. Для армирования применялись различные материалы – металлические стержни, полосы и сетки, пластик, геоткань, геосетки, резина. Рассматривались случаи центрального нагружения штампов и моделей с различным заглублением.

Предназначается специалистам, работающим в области механики грунтов и фундаментостроения, а также студентам строительных специальностей вузов.

УДК 624.13
ББК 366

ISBN 978-5-8265-1006-3

© Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Тамбовский государственный технический
университет» (ГОУ ВПО ТГТУ), 2011

ВВЕДЕНИЕ

Под армированными подразумеваются композиционные материалы, у которых одна из составляющих – арматура – обладает значительной жесткостью и прочностью по сравнению с другой – матрицей.

Подобно бетону, сопротивление грунта растяжению значительно меньше, чем сжатию. Наблюдения показали, что разрушение оснований происходит вследствие сдвигов отдельных объемов грунта. Одним из эффективных способов повышения прочности является включение в основание сооружения различных материалов – армирование. Оно увеличивает сопротивление грунта растяжению и сдвигу, ограничивает боковые деформации [16]. В качестве армирующих элементов используют органические, синтетические, металлические и каменные материалы. Новый строительный материал получил название «армированный грунт» [10, 15].

Рассматриваемый способ подготовки основания имеет ряд преимуществ по сравнению с другими [14]: используются готовые элементы, легко хранящиеся и монтируемые; большинство объема составляет грунт, имеющийся на месте или доставляемый из карьера; армированный грунт выдерживает неравномерные деформации без повреждений; имеется возможность возводить инженерные сооружения в сложных грунтовых условиях. К армированному грунту относят и естественные массивы с металлическими или железобетонными сваями, анкерами, туюфками из геоячеек. В качестве арматуры используют металлические стержни, сетки или пластины, покрытые цинком, эпоксидными или каменноугольными смолами; стекловолокно, пластик, полимерные волокна, алюминиевые сплавы, резину.

В качестве засыпки могут применяться как связные, так и несвязные послойно уплотнённые грунты. Армирование грунтов нашло широкое применение в дорожном строительстве; при устройстве насыпей, плотин, дамб, устоев мостов; при возведении подпорных стен и создании искусственных оснований. В фундаментостроении армированный грунт практически не используется. Однако научные разработки по этой проблеме ведутся в разных странах [11].

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСНОВАНИЯ

1.1. НЕСВЯЗНОЕ ОСНОВАНИЕ

При изучении физических характеристик в качестве основания использовался песок из Красненского карьера города Тамбова. Гранулометрический состав представлен в табл. 1.1 и на рис. 1.1.

В соответствии с [4] песок мелкий, степень неоднородности по Хазену $C_u = d_{60}/d_{10} = 1,47$ – песок однородный, коэффициент сортировки по П.И. Фадееву $s_p = d_{90}/d_{10} = 5,3$ – песок квазиоднородный, параметр неоднородности по В.Д. Мелентьеву $\Pi = d_{50} d_{90}/d_{10} = 1,2$ – песок однородный; коэффициент сортировки по Траску $s_0 = d_{75}/d_{25} = 1,75$. Параметр неоднородности по И.В. Дудлеру $\Pi_m = d_{50} d_{95}/d_5 = 3,3$ – песок однородный; коэффициент сбega по В.И. Охотину $K_c = q_2/q_1 = 31,9$ – песок оптимально сортированный.

1.1. Гранулометрический состав песка

Размеры частиц, мм	Более 10	10...5	5...2	2...1	1...0,5	0,5...0,25	0,25...0,1	Менее 0,1
Зерновой состав, %	0	0,1	1,3	1,6	13,1	23,3	51,8	8,8

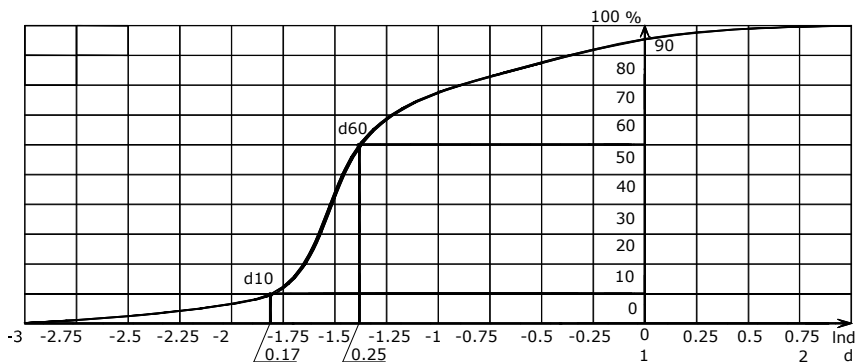


Рис. 1.1. График зернового состава песка

Морфологию зёрен изучали и фотографировали с помощью микроскопа ММУ-3. Зёрна весьма угловатые, несферичные. Коэффициент округлённости $\alpha = 0,12...0,17$; коэффициент сферичности $\beta = 0,6...0,8$. Коэффициент формы зёрен $k_{\phi} = \alpha\beta = 0,072...0,136$. Поверхность зёрен – шероховатая, ступенчатая. Степень шероховатости $R' = 5...6$.

Угол естественного откоса в воздушно-сухом состоянии равен 28° , при влажности $\omega = 0,05...32^{\circ}$.

Плотность воздушно-сухого песка при предельно рыхлом сложении $\rho = 1,44 \text{ г/см}^3$ ($e = 0,85$), маловлажного при $\omega = 0,05...1,52 \text{ г/см}^3$ ($e = 0,831$). Плотность воздушно-сухого песка при предельном уплотнении трамбовками – $1,7 \text{ г/см}^3$ ($e = 0,556$), маловлажного при $\omega = 0,05...1,79 \text{ г/см}^3$ ($e = 0,554$) [2].

Оптимальная влажность песка (ω_{opt}) определялась по лотковым испытаниям и по испытаниям на приборе «Союздорнии» – СПГ-1М для стандартного уплотнения грунтов [3].

Устанавливалась зависимость плотности скелета грунта от его влажности при трамбовании грунта с постоянной затратой работы на их уплотнение и в определении по этой зависимости максимальной величины плотности скелета грунта (γ_{max}). Влажность, при которой достигалась максимальная плотность скелета грунта, являлась оптимальной влажностью (ω_{opt}). Зависимость плотности сухого грунта от влажности по результатам испытаний на приборе стандартного уплотнения показана на рис. 1.2 [12].

Для уточнения этой зависимости проводили серию лотковых испытаний грунта на уплотнение с последовательным увеличением его влажности. Результаты испытаний представлены в табл. 1.2.

Переменная плотность достигалась различным фиксированным количеством ударов трамбовки по одному следу и контролировалась с помощью режущего кольца.

Компрессионные испытания проводились по ГОСТ 12248–96 [1].

Нагрузка на рычаг прибора передавалась ступенями с шагом в $0,03 \text{ кН}$, что соответствовало шагу давления на грунт в 50 кПа (первая ступень давления – 25 кПа). Каждая ступень нагрузки выдерживалась до условного затухания деформаций ($0,01 \text{ мм}$ за час наблюдений).

По результатам экспериментов построены компрессионные кривые (пример компрессионной кривой при $\rho = 1,9 \text{ г/см}^3$ на рис. 1.3) при различных значениях плотности и влажности, используя выражение

$$e_i = e_0 - \varepsilon_i (1 + e_0), \quad (1.1)$$

где e_0 – начальный коэффициент пористости; ε – относительная деформация грунта.

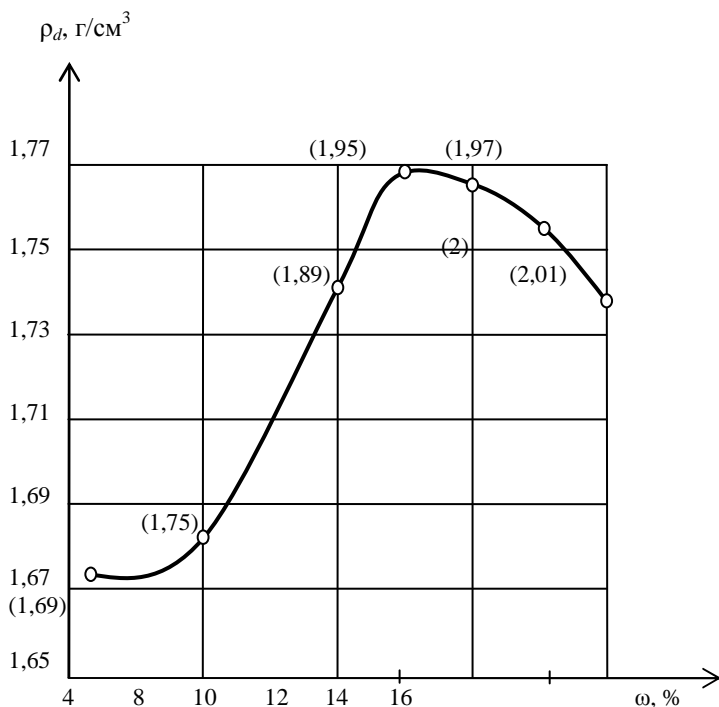


Рис. 1.2. Зависимость плотности скелета грунта от влажности по испытаниям на приборе «Союздорнии» (в скобках указана плотность грунта)

1.2. К определению оптимальной влажности грунта в лотках

Количество ударов трамбовки (n) по одному следу	Плотность скелета грунта ρ_d (г/см ³), при влажности ω (%)			
	$\omega = 5\%$	$\omega = 7\%$	$\omega = 10\%$	$\omega = 15\%$
$n = 1$	1,44	1,45	1,5	1,42
$n = 3$	1,50	1,53	1,55	1,47
$n = 5$	1,57	1,58	1,59	1,54
$n = 7$	1,62	1,63	1,64	1,6
$n = 10$	1,68	1,70	1,72	1,65

Модуль деформации при компрессионном испытании грунта определялся по формуле

$$E = (1 + e_0)\beta / m_0, \quad (1.2)$$

где m_0 – коэффициент сжимаемости; β – коэффициент, учитывающий отсутствие поперечного расширения грунта в компрессионном приборе определялся из выражения

$$\beta = 1 - (2v^2/1 - v), \quad (1.3)$$

где v – коэффициент поперечной деформации, принимался 0,3.

Результаты компрессионных испытаний представлены в табл. 1.3.

Жирным шрифтом выделены максимальные значения модуля деформации на каждой ступени нагружения.

Прочностные характеристики грунтов определялись методом одноплоскостного среза по результатам испытаний образцов грунта в сдвиговых приборах с фиксированной плоскостью среза (по ГОСТ 12248–96) [1].

Сдвиг проводился касательной нагрузкой при одновременной пригрузке образца нагрузкой, нормальной к плоскости среза. При этом каждая ступень давления выдерживалась не менее 5 мин до условной стабилизации деформаций среза (0,01 мм/мин).

1.3. Зависимость модуля деформации E от плотности и влажности песчаного основания

ρ_s , г/см ³	ω , %, при P (МПа)									
	8					10				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
1,6	4,1	8	9,5	10,1	10,8	3,4	7,4	9,8	10,0	10,4
1,7	4,5	9	10,8	10,9	11,4	3,5	9,7	11,2	11,6	11,9
1,8	5,1	8,5	11,4	11,6	12	5,3	9,8	12	13,8	14,2
1,9	5,2	8,7	12,6	12,9	13,2	5,4	9,8	12,9	14,0	14,3

ρ_s , г/см ³	ω , %, при P (МПа)									
	12					14				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
1,6	3,1	6,9	9,4	9,9	10,2	3	6,7	9,2	9,7	10,1
1,7	3,5	8,7	10,4	11,3	11,4	4	7,8	10	11,4	11,5
1,8	4,5	9,2	11,6	12,2	13,3	4,1	8,1	11,2	12,1	12,7
1,9	5	9,7	12,9	4,2	14,7	4,5	8,7	11,4	12,3	13,1

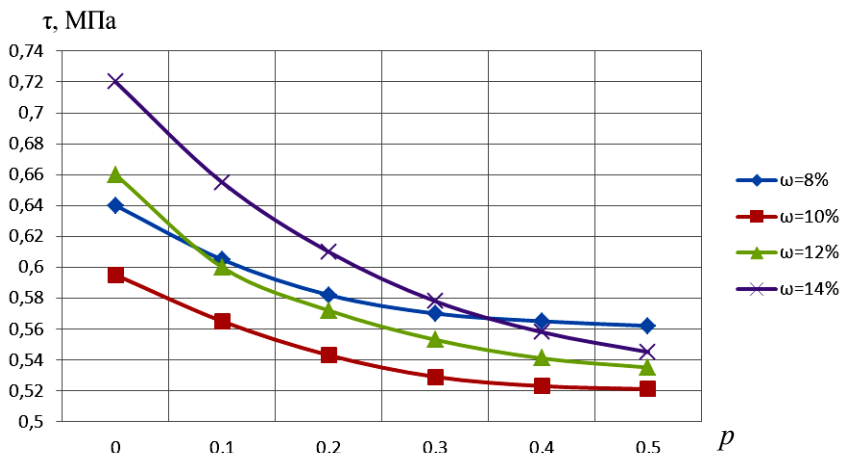


Рис. 1.3. Значения коэффициента пористости в зависимости от влажности на различных ступенях нагружения при плотности песчаного основания $\rho = 1,9 \text{ г/см}^3$

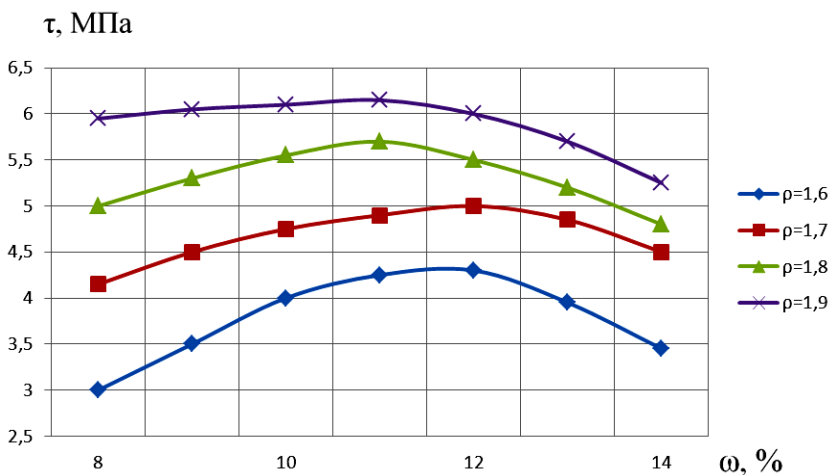


Рис. 1.4. Зависимость напряжений среза от влажности основания при $P = 0,1 \text{ МПа}$

Испытания проводились при влажности 8, 10, 12, 14%. Результаты сдвиговых испытаний при вертикальном давлении $P = 0,1$ и $P = 0,3$ МПа представлены на рис. 1.4 и 1.5.

Влияние плотности и влажности грунта на угол внутреннего трения представлено в табл. 1.4.

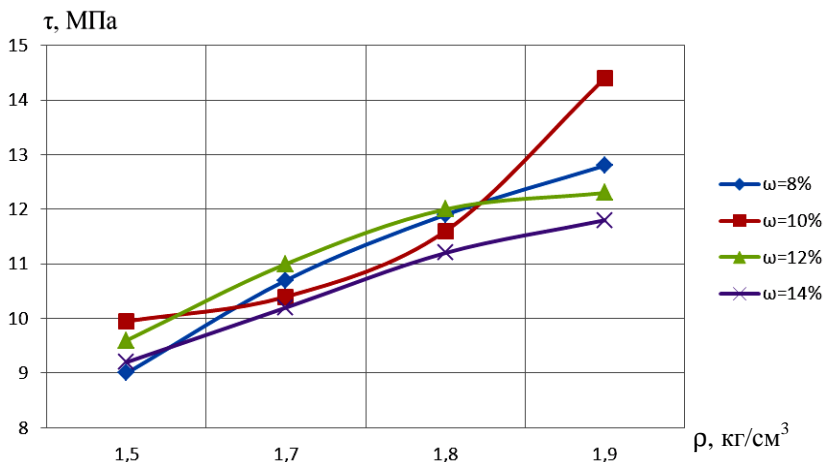


Рис. 1.5. Зависимость напряжений среза от плотности грунта при $P = 0,3$ МПа

1.4. Влияние влажности грунта на угол внутреннего трения

ρ, г/см³	φ (град) при ω			
	8	10	12	14
1,6	28,5/1,48	31,2/1,45	30,72/1,43	28,6/1,4
1,7	33,8/1,57	33,65/1,54	35,31/1,52	30,4/1,49
1,8	39,7/1,67	43,8/1,64	40,4/1,61	35,5/1,58
1,9	41,3/1,76	44,6/1,73	40,7/1,69	40,1/1,67

Примечание: В знаменателе приведены значения плотности сухого грунта.

1.2. СВЯЗНОЕ ОСНОВАНИЕ

Часть экспериментов проводили с глинистыми грунтами нарушенной структуры. В опытах меняли процентное содержание глинистых фракций – 25...100%. По результатам лабораторных исследований физических характеристик определяли вид и консистенцию грунтов (табл. 1.5).

Физические характеристики используемых смесей глинистых грунтов приведены в табл. 1.6.

Компрессионные испытания выполняли в приборе Гидропроекта по ГОСТ 12248–96 для каждой грунтовой модели. Результаты экспериментов представлены в табл. 1.7.

1.5. К определению консистенции глинистого грунта

№ смеси	Влажность на границе раскатывания ω_p	Влажность на границе текучести ω_l	Число пластичности I_p	Показатель текучести I_L
01	0,145	0,232	0,087	0,402
02	0,167	0,295	0,128	0,10
03	0,212	0,37	0,158	-0,20
04	0,23	0,41	0,180	-0,27

1.6. Физические характеристики глинистых грунтов

Физические характеристики грунта	Номер смеси			
	01	02	03	04
Плотность ρ , г/см ³	1,82...2,24	1,75...2,18	1,66...2,14	1,5...1,86
Плотность твёрдых частиц ρ_s , г/см ³	2,46	2,49	2,52	2,54
Плотность скелета грунта ρ_d , г/см ³	1,63...1,87	1,52...1,73	1,42...1,79	1,45...1,54
Пористость n	0,32...0,22	0,38...0,30	0,43...0,28	0,54...0,39
Коэффициент пористости e	0,48...0,29	0,62...0,43	0,75...0,38	1,19...0,65
Влажность ω	0,18	0,18	0,18	0,18
Степень влажности S_r	0,40	0,10	0,20	0,28

Номер смеси: 01 – суглинок лёгкий пылеватый тугопластичный; 02 – суглинок тяжёлый песчаный полутвёрдый; 03 – суглинок тяжёлый песчаный твёрдый; 04 – глина лёгкая пылеватая твёрдая.

Оптимальная влажность грунта определялась на приборе для стандартного уплотнения грунта СПГ-1М.

В качестве примера на рис. 1.7 приведена зависимость плотности скелета грунта от относительной влажности для модели 01.

1.7. Результаты компрессионных испытаний

Нагрузка p_i , МПа	Относительная деформация ϵ_i	Коэффициент пористости e_i	Коэффициент сжимаемости, a	Относительный коэффициент сжимаемости, a_0	Модуль деформации E_0 , МПа
<i>Модель грунта 01</i>					
0		0,402			
0,05	0,016	0,38	0,44	0,314	1,98
0,1	0,030	0,361	0,390	0,278	2,24
0,2	0,045	0,339	0,215	0,153	4,07
0,3	0,056	0,323	0,160	0,114	5,46
0,4	0,064	0,312	0,11	0,078	7,99
<i>Модель грунта 02</i>					
0		0,530			
0,05	0,008	0,518	0,24	0,157	3,97
0,1	0,016	0,505	0,26	0,17	3,66
0,2	0,028	0,487	0,18	0,118	5,28
0,3	0,038	0,472	0,15	0,098	6,36
0,4	0,047	0,459	0,13	0,085	7,33
<i>Модель грунта 03</i>					
0		0,62			
0,05	0,016	0,594	0,52	0,321	1,94
0,1	0,022	0,584	0,20	0,123	5,06
0,2	0,030	0,572	0,12	0,074	8,42
0,3	0,036	0,561	0,11	0,068	9,16
0,4	0,042	0,552	0,09	0,056	11,12
<i>Модель грунта 04</i>					
0		0,83			
0,05	0,010	0,812	0,36	0,197	3,16
0,1	0,015	0,803	0,18	0,098	6,36
0,2	0,023	0,789	0,14	0,077	8,09
0,3	0,028	0,778	0,11	0,06	10,38
0,4	0,034	0,767	0,10	0,055	11,33

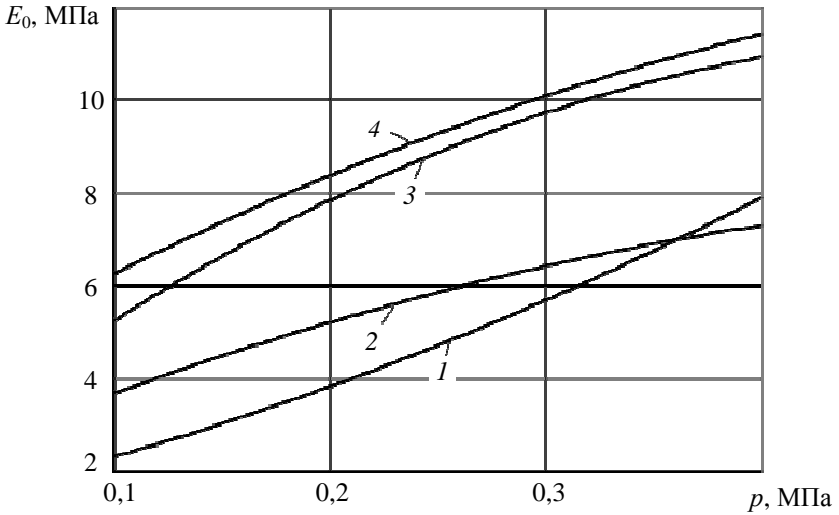


Рис. 1.6. График зависимости модуля деформации грунта от давления для моделей грунта:
 1 – 01; 2 – 02; 3 – 03; 4 – 04

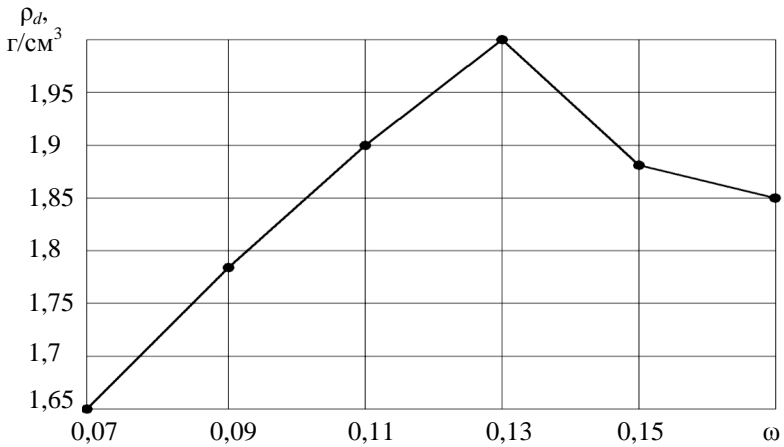


Рис. 1.7. График зависимости ρ_d – ω для суглинка с $I_p = 0,087$

Результаты компрессионных испытаний для твёрдого суглинка при $\omega = 0,04$ ($\omega_l = 0,23$; $\omega_p = 0,28$; $I_p = 0,087$; $I_l = -2,3$) при различной плотности приведены в табл. 1.8. В числителе приведены значения коэффициента пористости, в знаменателе – модуля деформации.

1.8. Зависимость деформационных характеристик грунта от плотности

Давление P , МПа	Значение e/E при ρ , г/см ³		
	1,48	1,51	1,58
0	0,782	0,748	0,670
0,0125	0,780/2,61	0,745/4,13	0,699/4,45
0,025	0,774/2,27	0,742/4,25	0,666/3,99
0,05	0,759/2,87	0,735/4,33	0,661/5,78
0,1	0,745/3,93	0,723/4,57	0,649/5,81
0,2	0,730/5,45	0,703/6,57	0,632/6,84
0,3	0,717/6,68	0,688/7,26	0,619/8,13
0,4	0,706/8,66	0,676/9,00	0,608/9,37

Сдвиговые неконсолидированные недренированные испытания проводили по методике быстрого сдвига на лабораторном сдвиговом приборе. Результаты испытаний представлены на рис. 1.8 и в табл. 1.9.

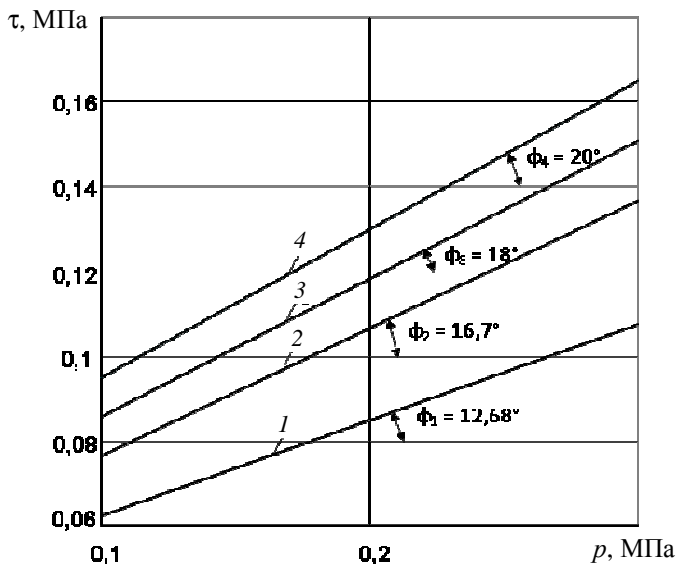


Рис. 1.8. Значения прочностных характеристик для различных моделей грунта

1.9. Результаты сдвиговых испытаний

Вид грунта	Вертикальная нагрузка F , кН	Сдвигающая нагрузка T , кН	Вертикальное давление p , МПа	Касательные напряжения τ , МПа	Сцепление c , кПа	Угол внутреннего трения φ , °
01	0,4	0,24	0,1	0,06	40	12,7
	0,8	0,36	0,2	0,09		
	1,2	0,42	0,3	0,105		
02	0,4	0,30	0,1	0,075	47	16,7
	0,8	0,44	0,2	0,11		
	1,2	0,54	0,3	0,135		
03	0,4	0,34	0,1	0,085	53	18
	0,8	0,48	0,2	0,12		
	1,2	0,60	0,3	0,15		
04	0,4	0,38	0,1	0,095	60	20
	0,8	0,52	0,2	0,13		
	1,2	0,66	0,3	0,165		

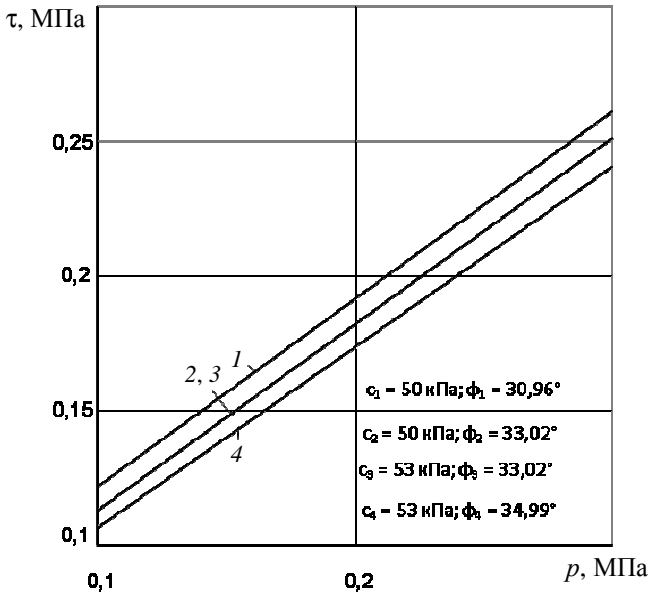


Рис. 1.9. Обобщенный график зависимости предельных касательных напряжений от нормальных для ρ (г/см³):
1 – 1,48; 2; 3 – 1,51; 1,58; 4 – 1,62

Результаты сдвиговых испытаний для твёрдого суглинка при $\omega = 0,04$ ($\omega_1 = 0,23$; $\omega_p = 0,28$; $I_p = 0,07$; $I_l = -2,3$) при различной плотности приведены на рис. 1.9.

1.3. ДВУХСЛОЙНОЕ ОСНОВАНИЕ

Исследования со стальным незаглублённым штампом $D = 120$ мм (D – диаметр штампа) проводились в металлическом лотке размером $1 \times 0,85 \times 0,6$ м, заполненном грунтом и оснащённом рычажной системой (табл. 1.10).

Верхний слой (несущий) двухслойного основания – супесь $I_p = 0,04$ и $\omega = 0,06 \dots 0,08$ (твёрдой консистенции). Нижний (подстилающий) слой – мелкий однородный песок с $\omega = 0,05 \dots 0,07$. Были проведены исследования с четырьмя вариантами двухслойного основания (представлены в табл. 1.11). Основания формировались слоями по 5...6 см, которые уплотнялись ручной трамбовкой до плотности $\rho = 1,75$ г/см³. Последняя контролировалась методом режущего кольца и протарированного плотномера. Нагружение осуществляли ступенями. Общее число их колебалось от 10 до 15. В опытах принимали четыре временных интервала нагружения (15, 150, 500, 1500 с).

При толщине верхнего слоя (супеси), равной $2D = 30$ см, глубина зоны деформаций не превышает толщину верхнего слоя и поэтому подстилающий грунт (песок) не оказывает заметного влияния на несущую способность.

При уменьшении толщины верхнего слоя с 30 до 10 см несущая способность падала при первых трёх интервалах нагружения и оставалась стабильно постоянной при последнем.

При интервале нагружения, равном 150 с, наблюдалось существенное повышение значений разрушающей нагрузки.

1.10. Модели двухслойного основания

Грунт	Толщины слоёв моделей грунтового основания, см			
	А	Б	В	Г
Супесь	80	30	20	10
Песок	–	50	50	50

1.11. Величины разрушающих нагрузок при двухслойном основании

Модель основания	Разрушающая нагрузка, кН, при интервале нагружения, с			
	15	150	500	1500
А	3,96	4,86	4,32	3,60
Б	3,96	4,86	4,32	3,60
В	3,60	4,14	3,96	3,55
Г	3,42	3,78	3,78	3,50

1.4. ОСЛАБЛЕНИЕ ОСНОВАНИЯ ЛИНЗАМИ

В основании зданий возможно наличие слабого грунта, залегающего не целым массивом или прослойкой, а отдельными линзами. Наличие таких линз при геологических изысканиях определить достаточно сложно, а влияние их на несущую способность основания может быть значительным.

В рассматриваемой серии экспериментов устанавливались функциональные зависимости несущей способности основания, скорости развития деформаций от различного расположения линз слабого слоя, их мощности.

Моделью фундамента служил цилиндрический плоский штамп диаметром $d_{st} = 100$ мм. Глубину залегания и размер линз принимали кратным диаметру штампа d_{st} , т.е. $h = nd_{st}$, где $n = 0; 0,5; 1; 1,5$. Перемещения s, u, i (s – осадки; u – горизонтальное перемещение; i – крен), а также их предельные значения s_u, u_u, i_u , соответствующие достижению разрушающей нагрузки F_u , определяли по показаниям индикаторов ИЧ-10.

Испытания проводили в лотке с размерами $550 \times 650 \times 750$ мм. Основной, более прочный грунт был сформирован из мелкого песка ($\rho = 1,6$ г/см³, $\omega = 0,07$), линзы слабого грунта были подготовлены из влажных древесных опилок хвойных пород ($\rho = 0,5$ г/см³; $\omega = 0,5$). Линза смоделирована в виде параллелепипеда мощностью d_{st} на всю длину лотка (рис. 1.10).

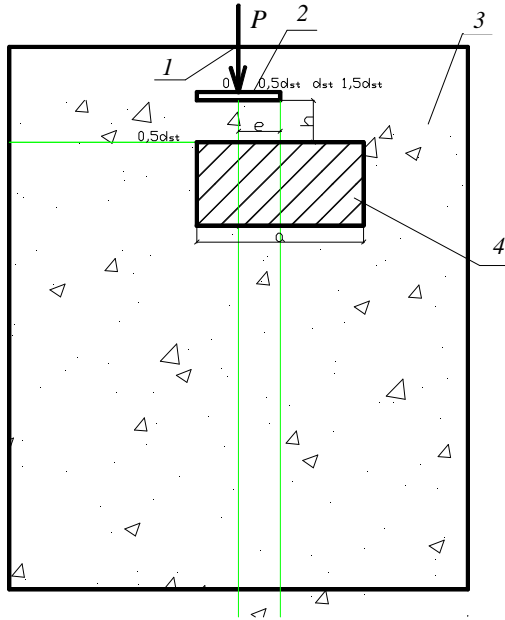


Рис. 1.10. Размещение линз:

1 – нож рычага; 2 – штамп; 3 – основной грунт; 4 – линза

При проведении экспериментов изменялись следующие параметры: h – глубина залегания линзы (расстояние от нижней плоскости штампа до верхней плоскости слабого грунта); e – эксцентриситет оси линзы относительно оси штампа; a – ширина линзы. При обработке результатов использовали относительные характеристики: $\bar{h} = h/d_{st}$; $\bar{a} = a/d_{st}$; $\bar{e} = e/d_{st}$. Результаты испытаний представлены в табл. 1.12 и на рис. 1.11–1.12.

1.12. Результаты экспериментов

$\bar{h} = h/d_{st}$	0,5											
$\bar{a} = a/d_{st}$	1				1,5				2			
$\bar{e} = e/d_{st}$	0	0,5	1	1,5	0	0,5	1	1,5	0	0,5	1	1,5
$F_u, \text{кН}$	5,4	6,3	7,2	11,7	4,5	4,5	5,4	9	4,5	4,5	5,4	6,3
$S_u, \text{М} \cdot 10^{-5}$	472	786	324	614	461	269	339	375	452	184	360	340
$u_u, \text{М} \cdot 10^{-5}$	0	72	266	42	0	6,3	16	81	0	42	56	108
$\bar{h} = h/d_{st}$	1,5											
$\bar{a} = a/d_{st}$	1				1,5				2			
$\bar{e} = e/d_{st}$	0	0,5	1	1,5	0	0,5	1	1,5	0	0,5	1	1,5
$F_u, \text{кН}$	9,9	9,9	10,8	10,8	8,1	9,0	7,2	8,1	8,1	9,9	11,7	8,1
$S_u, \text{М} \cdot 10^{-5}$	481	439	449	349	474	471	420	363	606	489	751	498
$u_u, \text{М} \cdot 10^{-5}$	0	21	140	114	0	107	132	143	0	10	126	185

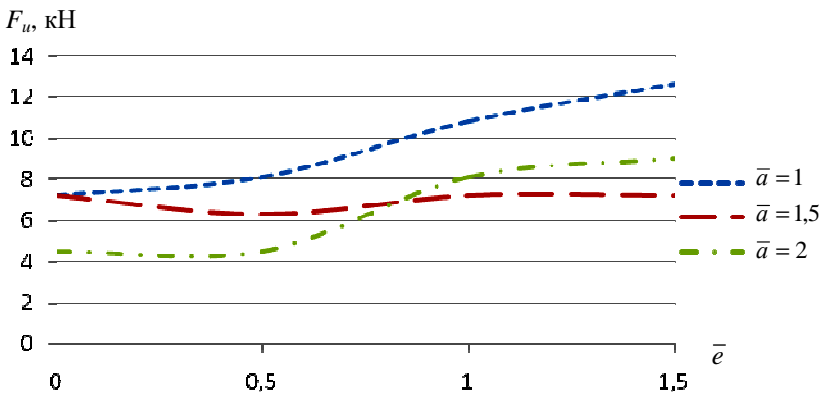


Рис. 1.11. Зависимость несущей способности основания от приведенного эксцентриситета

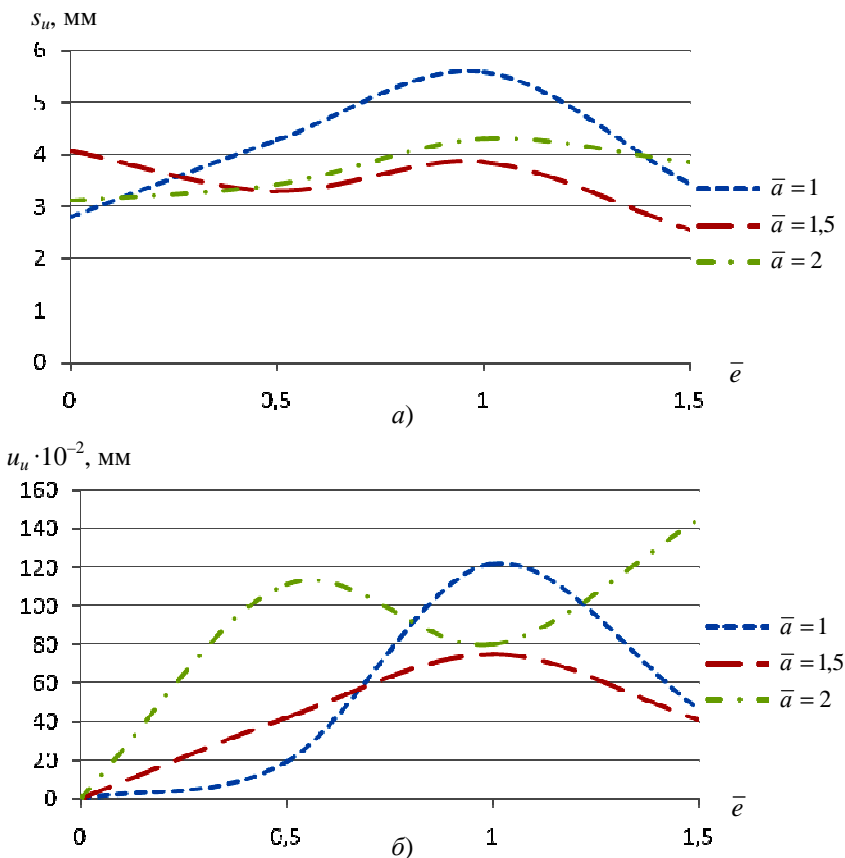


Рис. 1.12. Графики зависимостей $s_u(a)$; $u_u(b)$ от относительного эксцентриситета

При значении относительного эксцентриситета $\bar{e} = 1,5$ и при ширине линзы $\bar{a} = 1$ её наличие не сказывается на напряжённо-деформированном состоянии основания.

Наибольшее влияние линзы отмечено при $\bar{h} = 0,5$, $\bar{e} = 0,5$. Это вызвано тем, что под краями штампа располагаются наибольшие значения сдвиговых (касательных) напряжений.

Максимальная осадка наблюдалась при отсутствии эксцентриситета оси линзы относительно оси штампа (вдоль максимума нормальных напряжений).

Графики зависимостей F_u , s_u , u_u от относительного эксцентриситета $\bar{e} = e/d_{st}$ при $\bar{h} = h/d_{st} = 1$ представлены на рис. 1.11.

2. ДИСКРЕТНОЕ АРМИРОВАНИЕ

2.1. ВЕРТИКАЛЬНОЕ СТЕРЖНЕВОЕ АРМИРОВАНИЕ

Для усиления основания использовали гладкие и рифлёные стержни, которые располагались под подошвой модели, так и вне подошвы. Стержнями предполагалось ограничить боковые деформации.

2.1.1. ОПЫТЫ СО ШТАМПАМИ

В качестве грунта в основном использовался мелкий однородный песок и твёрдый суглинок, характеристики которых приведены в главе 1.

Испытания проводились на круглых стальных штампах с $D = 120, 150, 175$ мм. Процент армирования при одинаковой длине стержней рассчитывали по формуле

$$\mu = A_s / A_{\text{шт}} = \frac{\pi r_s^2 (R_{\text{шт}} \pm h_s)}{\pi R_{\text{шт}}^2 s} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где A_s – площадь поперечного сечения стержней; $A_{\text{шт}}$ – площадь штампа [9].

При различной длине стержней эффективность армирования оценивалась по относительному объёму арматуры:

$$\bar{V} = V_s / A_{\text{шт}} = \frac{\pi r_s^2 (R_{\text{шт}} \pm h_s) l_s}{\pi R_{\text{шт}}^2 s} \cdot 100\%. \quad (2)$$

В опытах изменялось расположение стержней (под подошвой и вне подошвы фундамента), шаг стержней, процент армирования, диаметр и длина, а также угол наклона и количество рядов (ярусов) армирования (рис. 2.1).

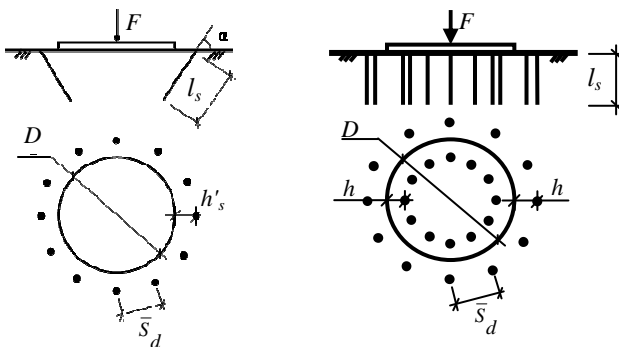


Рис. 2.1. Схема расположения стержней

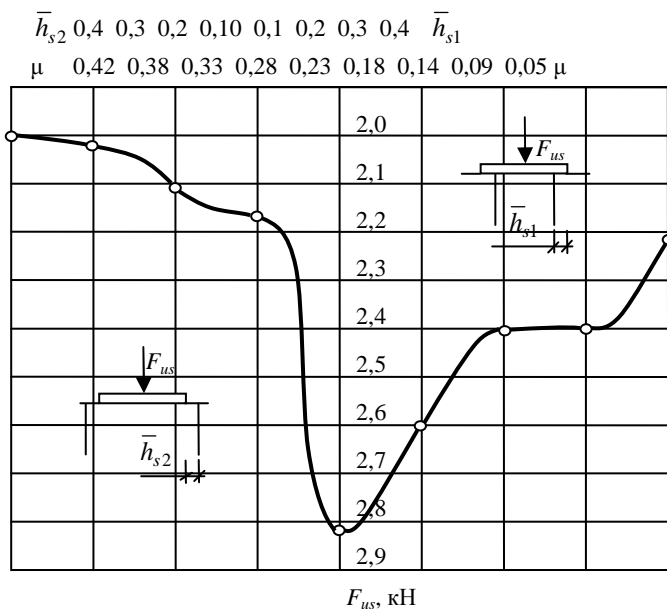


Рис. 2.2. Влияние расстояния до армирующего элемента, процента армирования на несущую способность основания

В первой серии опытов стержни располагались вертикально с постоянным шагом $\bar{s} = s/D = 0,2 = \text{const}$. Использовался штамп $D = 120$ мм, диаметр стержней $d_s = 5$ мм, длина $l_s = 120$ мм. Разрушающая нагрузка без армирования составила 1,6 кН.

Изменялся процент армирования и расположение (под подошвой и вне подошвы). Результаты экспериментов приведены на рис. 2.2.

Наибольшее влияние на несущую способность оказывало расположение стержней. С удалением от границы штампа несущая способность падала независимо от процента армирования. Расположение арматуры под подошвой более эффективно, чем вне подошвы [7].

Испытания с этим же штампом и армирующими элементами проводились на твёрдом суглинке (при $\omega = 0,04$; $\omega_l = 0,23$; $\omega_p = 0,28$; $I_p = 0,087$; $I_l = -2,3$).

Размещение стержней проводилось под штампом на расстоянии $0,5R$; $0,75R$; R , и вне штампа $1,25R$; $1,5R$; $1,75R$ (R – радиус штампа). Шаг стержней оставался постоянным $\bar{s} = s/D = 0,2 = 24$ мм = const. Зависимость несущей способности от расстояния до стержней и уравнение аппроксимации представлены на рис. 2.3.

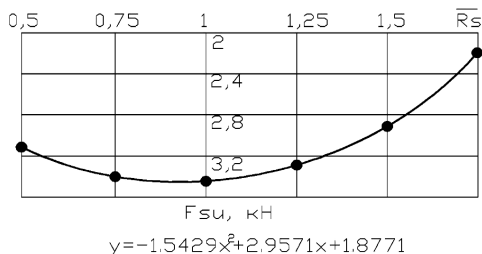


Рис. 2.3. Зависимость несущей способности основания штампа от расстояния до стержней арматуры

В опытах с постоянным процентом армирования $\mu = 0,38\%$ использовались стержни $d_s = 5$ мм при $l_s = 120$ мм. Нагрузка на песчаное основание передавалась через штамп $D = 120$ мм. В опытах менялся относительный шаг стержней \bar{s} от 0,01 до 0,42. Результаты опытов представлены на рис. 2.4.

Максимальная несущая способность наблюдалась при размещении стержней по грани штампа, в месте развития наибольших касательных и сдвиговых напряжений. Уменьшение шага менее $0,15D$ не приводило к повышению несущей способности. С увеличением расстояния между стержнями свыше $0,3D$ несущая способность уменьшалась [6].

\bar{h}_{s2}	\bar{s}	\bar{h}_{s1}
-0,4	0,42	0,4
-0,3	0,37	0,3
-0,2	0,32	0,2
-0,1	0,27	0,1
0	0,21	0
0,1	0,16	0,1
0,2	0,11	0,2
0,3	0,06	0,3
0,4	0,01	0,4

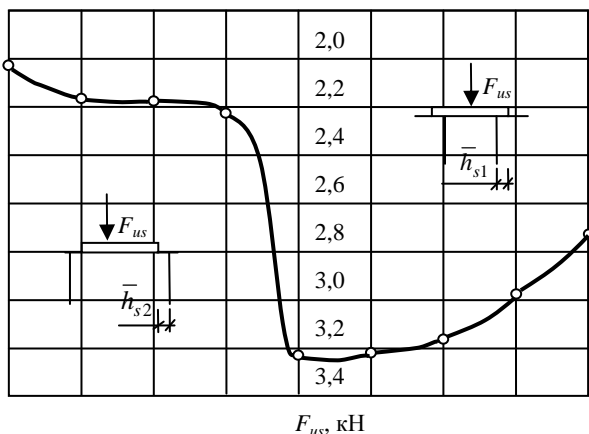


Рис. 2.4. Влияние расположения и шага стержней на относительную несущую способность основания при постоянном проценте армирования

2.1. Влияние диаметра и длины стержней на несущую способность основания

l_{s1} , мм	$\bar{F}_{us} (\bar{F}_{us} / \bar{V})$ при d_s , мм			
	3	4	5	6
60	0,98 (0,35)	0,99 (0,2)	1,02 (0,13)	1,04 (0,1)
120	1,15 (0,22)	1,15 (0,12)	1,17 (0,08)	1,3(0,07)
180	1,23 (0,16)	1,15 (0,08)	1,38 (0,06)	1,46 (0,05)
240	1,3 (0,12)	1,46 (0,08)	1,69 (0,06)	1,77 (0,04)
300	1,61 (0,12)	1,84 (0,08)	1,92 (0,05)	2,07 (0,04)

Влияние диаметра и длины стержней на несущую способность оценивали по относительному объёму. Использовали стержни диаметром 3, 4, 5, 6 мм при длине 60, 120, 180, 240 и 300 мм. Относительный шаг стержней $\bar{s} = 0,1$; относительное расстояние от штампа $\bar{h}_s = h_s / D = 0,2$. Арматуру размещали вне штампа. Результаты опытов приведены в табл. 2.1.

При постоянной длине стержней $l_s = 300$ мм и постоянном относительном шаге $\bar{s} = 0,2$ изменяли диаметр и расстояние до армирующего элемента с целью определения оптимальных величин. Арматуру размещали вне подошвы штампа. Результаты опытов оценивали по отношению несущей способности к проценту армирования (табл. 2.2).

С увеличением диаметра стержней и расстояния до арматуры удельная несущая способность основания падала.

2.2. Зависимость удельной несущей способности основания от расстояния до арматуры

\bar{h}_{s2}	\bar{F}_{us} / μ при d_s , мм			
	3	4	5	6
0	2,32	1,21	1,06	0,81
0,2	2,04	1,09	1,01	0,72
0,4	1,78	1	0,74	0,56

Следующая серия экспериментов проводилась со стержнями $l_s = 60$ мм, $d_s = 4$ мм. Стержни размещали по грани штампа и смещали внутрь на $\bar{h}_{s1} = 0,2; 0,4$ и наружу на $\bar{h}_{s2} = 0,2; 0,4$. При каждом смещении изменяли шаг стержней: $\bar{s} = 0,1; 0,15; 0,2; 0,3; 0,4$ и, соответственно, процент армирования (рис. 2.5).

Максимальная разрушающая нагрузка была отмечена при $\bar{h}_s = 0$; $\bar{s} = 0,2$. Уменьшение шага менее $0,2D$ и, как следствие, увеличение процента армирования не приводило к повышению несущей способности.

Результаты опытов с двойным армированием представлены в табл. 2.3. Эксперименты проводились при $\bar{s} = 0,2$; $l_s = 120$ мм, $d_s = 3; 5$ мм. Один ряд арматуры располагался под подошвой штампа, второй ряд – снаружи.

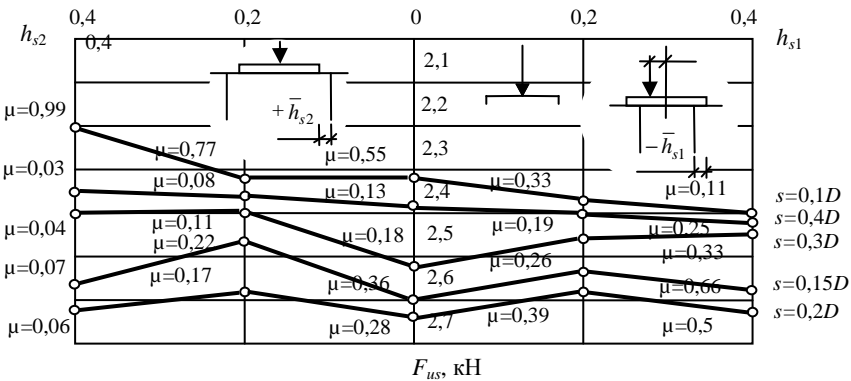


Рис. 2.5. Влияние интенсивности армирования на несущую способность основания

2.3. Влияние двойного армирования на несущую способность фундамента

\bar{h}_{s1}	0	0	0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3
\bar{h}_{s2}	0,1	0,2	0,3	0,1	0,2	0,3	0,1	0,2	0,3	0,1	0,2	0,3
\bar{F}_{us} $\mu d_s = 3$	1,97	1,82	1,91	1,74	1,8	1,74	1,78	1,74	1,74	1,65	1,70	1,6
	0,35	0,38	0,41	0,31	0,34	0,37	0,28	0,31	0,34	0,25	0,28	0,3
\bar{F}_{us} $\mu d_s = 5$	2,19	2,36	2,23	1,86	1,69	1,98	1,72	1,69	1,82	1,58	1,63	1,6
	0,95	1,04	1,13	0,87	0,96	1,05	0,78	0,87	0,96	0,69	0,78	0,9

Примечание: \bar{h}_{s1} – смещение стержней под подошву штампа; \bar{h}_{s2} – смещение стержней наружу.

Максимальная разрушающая нагрузка была отмечена при расположении одного ряда стержней в месте развития наибольших касательных напряжений, т.е. по грани штампа, а второго ряда на расстоянии $0,1 \dots 0,2D$ наружу.

С увеличением диаметра стержней и процента армирования несущая способность также возрастала.

В следующей серии экспериментов арматуру вводили в основание под наклоном с углом к горизонтали $\alpha = 15, 25, 35, 45, 60, 75^\circ$. Армирование основания производилось стержнями длиной $l_s = 120$ мм, диаметром $d_s = 5$ мм, относительный шаг армирования $\bar{s} = 0,87$ при относительном расстоянии $\bar{h}_s = 0,2$ и $\bar{s} = 1,12$ при $\bar{h}_s = 0,4$.

Общий график зависимости относительной несущей способности основания \bar{F}_{us} от угла наклона арматуры представлен на рис. 2.6.

Опыты с наклонным армированием при постоянном шаге $s = 0,2D$ и $s = 0,4D$ при переменном объёме арматуры проводились при длине арматуры 60 и 120 мм со стержнями диаметром 3 и 5 мм. Результаты представлены в табл. 2.4 и 2.5.

Чем меньше угол наклона стержней к горизонтали, тем больше значения \bar{F}_{us} . Армирование стержнями с меньшим диаметром более эффективно по расходу арматуры. При относительной длине арматуры $\bar{l}_s \leq 1$ не замечено повышение несущей способности, очевидно из-за недостаточных размеров зоны анкеровки.

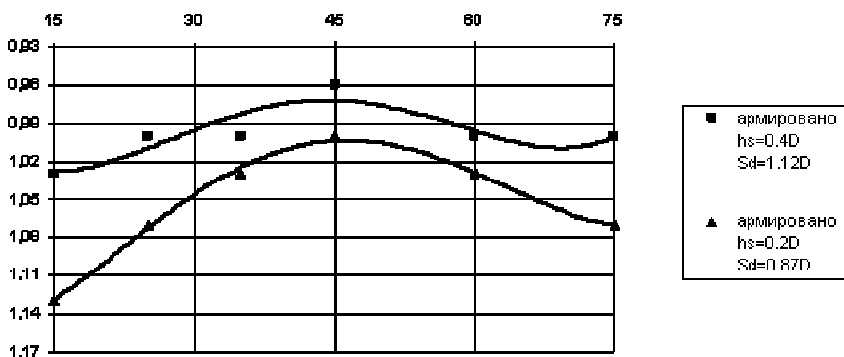


Рис. 2.6. Влияние угла наклона арматуры на относительную несущую способность основания \bar{F}_{us} , при диаметре стержней $d_s = 5$ мм и проценте армирования $\mu = 0,87\%$

**2.4. Влияние угла наклона стержней ($d_s = 3$ мм)
на относительную несущую способность основания**

α, град	\bar{F}_{us} при $\bar{h}_s = 0,2$				\bar{F}_{us} при $\bar{h}_s = 0,4$			
	$s = 0,2D$		$s = 0,4D$		$s = 0,2D$		$s = 0,4D$	
	$l_s =$ = 60 мм	$l_s =$ = 120 мм	$l_s =$ = 60 мм	$l_s =$ = 120 мм	$l_s =$ = 60 мм	$l_s =$ = 120 мм	$l_s =$ = 60 мм	$l_s =$ = 120 мм
15	1,16	1,43	1,06	1,25	0,98	1,74	1,1	1,41
30	1,07	1,39	1,05	1,24	0,99	1,43	1,01	1,16
45	1,09	1,28	1,05	1,13	1,02	1,16	1,02	1,12
60	1,08	1,26	1,14	1,14	1,13	1,2	1,05	1,15
75	1,14	1,24	1,1	1,16	1,09	1,17	1,04	1,13

**2.5. Влияние угла наклона стержней ($d_s = 5$ мм)
на относительную несущую способность основания**

α, град	\bar{F}_{us} при $\bar{h}_s = 0,2$				\bar{F}_{us} при $\bar{h}_s = 0,4$			
	$s = 0,2D$		$s = 0,4D$		$s = 0,2D$		$s = 0,4D$	
	$l_s =$ = 60 мм	$l_s =$ = 120 мм	$l_s =$ = 60 мм	$l_s =$ = 120 мм	$l_s =$ = 60 мм	$l_s =$ = 120 мм	$l_s =$ = 60 мм	$l_s =$ = 120 мм
15	1,12	1,84	1,14	1,41	1,02	1,84	0,98	1,51
30	1,08	1,69	1,0	1,38	1	1,42	1	1,23
45	1,09	1,45	1,12	1,14	1,03	1,28	1	1,25
60	1,1	1,36	1,11	1,16	1,06	1,18	1,12	1,2
75	1,11	1,18	1,09	1,17	1,05	1,24	1	1,15

В опытах со штампом $D = 175$ мм при постоянном шаге стержней $\bar{s} = 0,2$; при относительной длине $\bar{l}_s = 2$ нагрузка прикладывалась вертикально центрально ($e_0 = 0$) и внецентренно с $e_0 = 0,25R$; расстояние от штампа до вертикально расположенных вне подошвы стержней $\bar{h}_{s2} = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$. Стержни диаметром 4 мм располагались отдельно и объединялись поверху в каркас.

Относительная несущая способность $\bar{F}_{us} = F_{us} / F_u$ для отдельно расположенных стержней меньше, чем для тех же стержней, связанных в каркас (рис. 2.7). Уменьшение длины стержней с $\bar{l}_s = 2$ до $\bar{l}_s = 1,5$ привело к снижению относительной несущей способности в 1,2 раза.

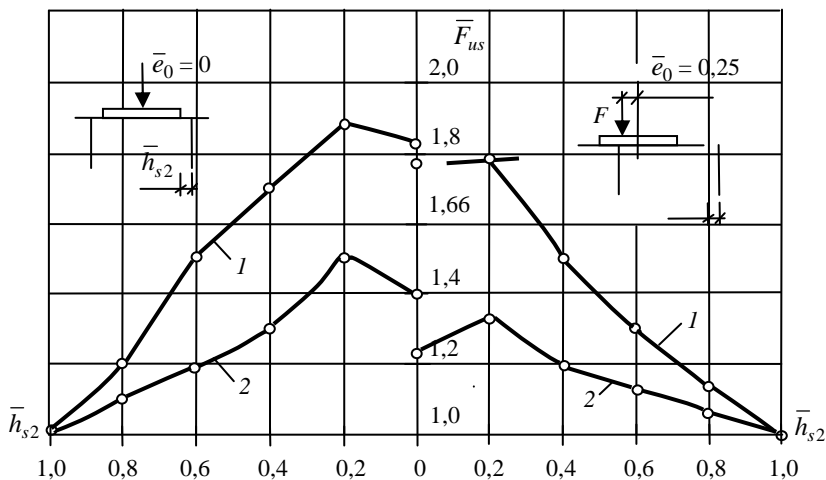


Рис. 2.7. Влияние вертикального стержневого армирования на относительную несущую способность основания:
 1 – для стержней, связанных в каркас; 2 – для отдельных стержней

В следующей серии экспериментов изменяли относительный эксцентриситет приложения нагрузки $\bar{e}_0 = e_0 / R = 0,5$ (e_0 – эксцентриситет приложения силы; R – радиус штампа). Армирование основания производилось стержнями длиной $l_s = 60, 120, 180$ мм; диаметр стержней $d_s = 3, 4, 5, 6$ мм; относительный шаг стержней $\bar{S}_d = 0,2D$; расстояние от штампа до армирующих элементов – $h_s = 0$.

Увеличение размеров и диаметра стержней вело к повышению относительной несущей способности (рис. 2.8). Скорость развития осадки и крена модели на армированном основании значительно ниже, чем на неармированном (рис. 2.9).

Определено, что при вертикальном армировании наибольшее влияние на несущую способность оказывало расстояние до стержней. С удалением арматуры от границы штампа несущая способность падала независимо от процента армирования.

Размещение стержней под подошвой штампа более эффективно, чем вне подошвы. Максимальная несущая способность получена при размещении стержней по грани штампа – в месте развития наибольших касательных и сдвиговых напряжений при $\bar{h}_s = 0$; $s = (0,15; 0,2) D$. Для $s < 0,15D$ увеличение процента армирования не приводило к повышению несущей способности. С увеличением расстояния между стержнями свыше $0,3D$ несущая способность уменьшалась.

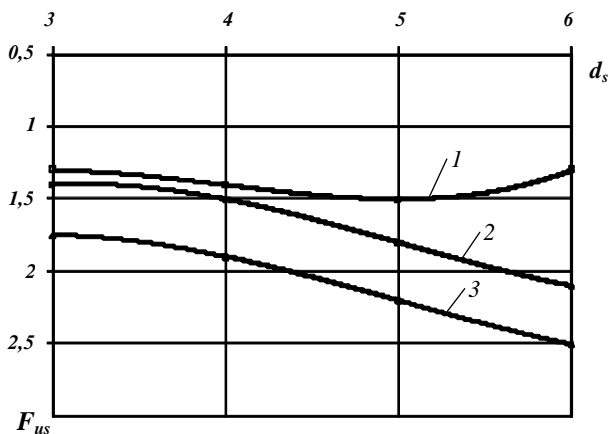


Рис. 2.8. Зависимость относительной разрушающей нагрузки от диаметра и длины стержней:

$1 - l_s = 60$ мм уравнение $y = -0,05x \cdot 3 + 0,6x \cdot 2 - 2,25x + 4$;
 $2 - l_s = 12$ мм уравнение $y = 0,1x \cdot 3 - 1,275x \cdot 2 + 5,525x - 5,1$;
 $3 - l_s = 18$ мм уравнение $y = -0,425x \cdot 3 + 5,475x \cdot 2 - 21,55x + 29,55$;
 ———— — полиномиальная $l_s = 180$ мм
 уравнение $y = -0,425x \cdot 3 + 5,475x \cdot 2 - 21,55x + 29,55$

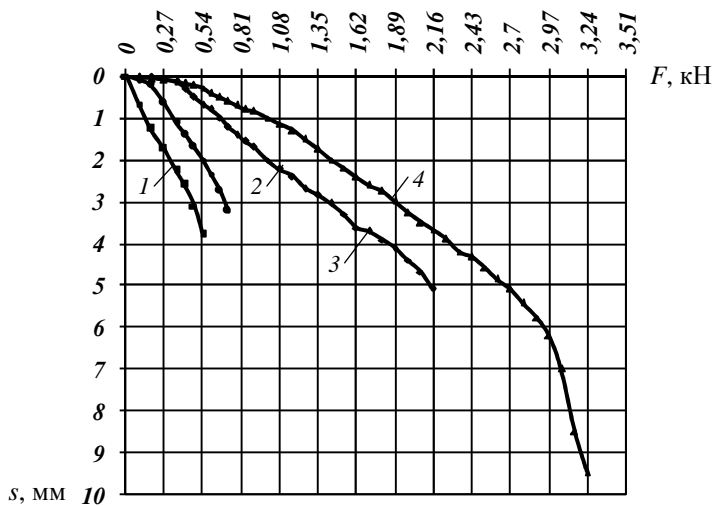


Рис. 2.9. Развитие средней осадки модели в зависимости от длины арматуры при $d_s = 6$ мм:

1 — не армировано; $2 - l_s = 60$ мм; $3 - l_s = 120$ мм; $4 - l_s = 180$ мм

При двойном вертикальном армировании один ряд арматуры располагали под подошвой штампа, второй ряд – снаружи. Максимальная разрушающая нагрузка была отмечена при расположении одного ряда стержней в месте развития наибольших касательных напряжений, т.е. по грани штампа, а второго ряда на расстоянии $(0,1 \dots 0,2)D$ наружу.

С увеличением диаметра стержней и процента армирования несущая способность также возрастала. Относительная несущая способность $\bar{F}_{us} = F_{us} / F_u$ для отдельно расположенных стержней меньше, чем для тех же стержней, связанных в каркас.

Уменьшение длины стержней с $\bar{l}_s = 2$ до $\bar{l}_s = 1,5$ привело к снижению относительной несущей способности в 1,2 раза. Увеличение $l_s > (1,5 \dots 2)D$ неэффективно, так как длина зоны анкеровки стержней уже достаточна.

При наклонном армировании песчаного основания (при переменном и постоянном проценте армирования) оптимальный угол наклона стержней составил 15° к вертикали.

2.1.2. ОПЫТЫ С МОДЕЛЯМИ

В опытах с моделью $D = 130$ мм, при $\lambda = 1$, нагрузка прикладывалась центрально вертикально и наклонно с углом наклона к вертикали $\alpha = 10$ и 20° . Изменялось расстояние до стержней $d_s = 4$ мм, расположенных вертикально вокруг модели, длина $l_s = 130, 200, 260$ мм; шаг 25, 16, 12, 8 мм. Стержни диаметром 8 мм располагались отдельно или связывались в каркас. Результаты опытов приведены на рис. 2.10 – 2.15.

С увеличением расстояния до арматуры более 15 мм ($\approx 0,1D$) несущая способность уменьшалась (рис. 2.9), а скорость развития крена увеличивалась (рис. 2.12). Увеличение длины стержней более $1,5D$ неэффективно, так как зона анкеровки стержней уже достаточна (рис. 2.11 и 2.15). С уменьшением шага стержней несущая способность основания возрастает.

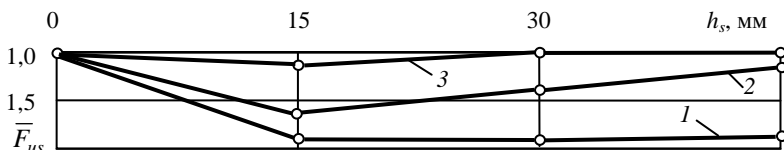


Рис. 2.10. Влияние расстояния до стержневой арматуры h_s на относительную несущую способность армированного основания \bar{F}_{us}

при $l_s = 130$ мм, $s = 25$ мм и углах наклона нагрузки:

1 – $\alpha = 0^\circ$; 2 – $\alpha = 10^\circ$; 3 – $\alpha = 20^\circ$

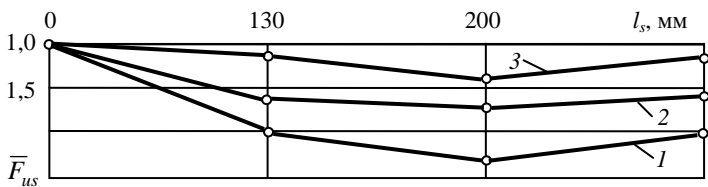


Рис. 2.11. Влияние длины арматурных стержней l_s на относительную несущую способность армооснования \bar{F}_{us} при $s = 25$ мм, $h_s = 15$ мм и различных углах наклона нагрузки: 1 – $\alpha = 0^\circ$; 2 – $\alpha = 10^\circ$; 3 – $\alpha = 20^\circ$

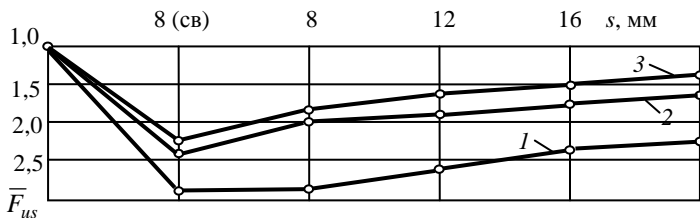


Рис. 2.12. Влияние шага стержней арматуры s на относительную несущую способность армооснования \bar{F}_{us} при $l_s = 200$ мм, $h_s = 15$ мм и различных углах наклона нагрузки: 1 – $\alpha = 0^\circ$; 2 – $\alpha = 10^\circ$; 3 – $\alpha = 20^\circ$ (св) – связанный каркас

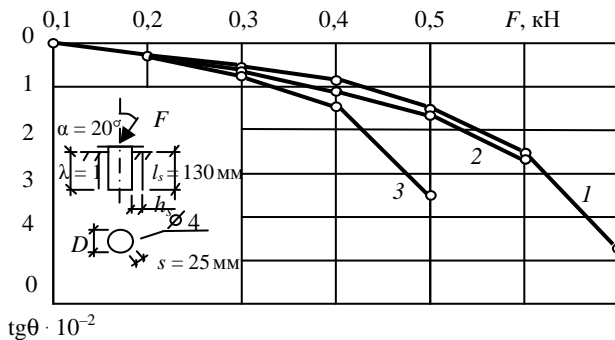


Рис. 2.13. Зависимость крена модели от нагрузки при $\lambda = 1$, $\alpha = 20^\circ$, $l_s = 130$ мм, $s = 25$ мм и h_s : 1 – 15 мм; 2 – 30 мм; 3 – 45 мм

Объединение стержней в каркас также приводит к возрастанию разрушающей нагрузки и снижению абсолютных значений осадок, горизонтальных перемещений и крена (рис. 2.12 и 2.14).

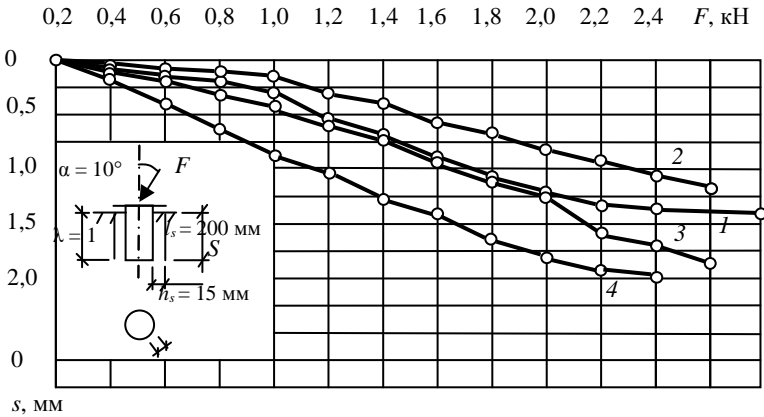


Рис. 2.14. Зависимость осадки от нагрузки
 при $\lambda = 1$, $\alpha = 10^\circ$, $l_s = 200$ мм, $h_s = 15$ мм и шаге стержней s :
 1 – 8 мм; 2 – 12 мм; 3 – 16 мм; 4 – 25 мм

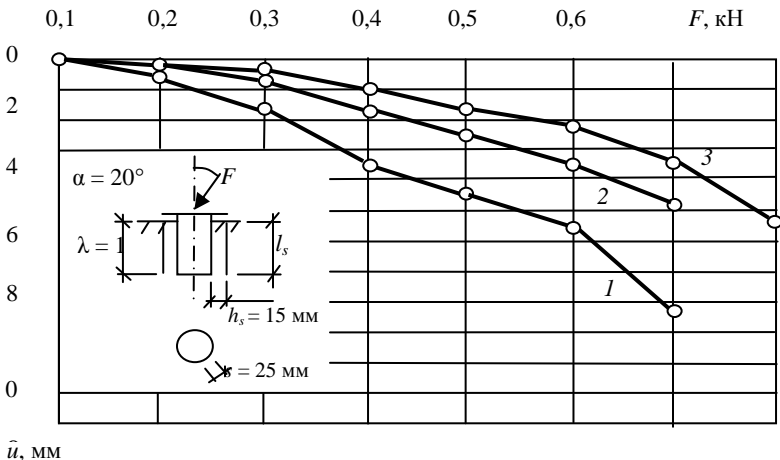


Рис. 2.15. Зависимость горизонтального перемещения от нагрузки
 при $\lambda = 1$, $\alpha = 20^\circ$, $h_s = 15$ мм, $s = 25$ мм и длине стержней l_s :
 1 – 130 мм; 2 – 200 мм; 3 – 260 мм

Метод вертикального стержневого армирования появился сравнительно недавно. Аналогом этого метода является свайный фундамент с промежуточной подушкой. В этом фундаменте, как и в методе вертикального стержневого армирования, ростверк (штамп) не имеет прочной связи со сваями (арматурой), что является отличительной особенностью в отличие от обычных свайных фундаментов с низким ростверком.

В том случае, когда армирование выполняется под подошвой рост-верка, нагрузка от вышележащих конструкций передаётся на грунт подушки и через сваи на окружающий их грунт за счёт сил трения.

Работа армоэлемента в грунте обеспечивается боковым обжатием и силами трения. Армоэлемент через контактную поверхность с грунтом или с фундаментом воспринимает нагрузку своей верхней частью и передает её на нижележащие слои своей нижней частью. Вертикальные стержни служат для восприятия сжимающих напряжений.

При армировании вокруг модели несущая способность возрастает за счёт ограничения зон сдвиговых деформаций и передачи бокового давления на большую площадь грунта.

2.2. ГОРИЗОНТАЛЬНОЕ СТЕРЖНЕВОЕ АРМИРОВАНИЕ

2.2.1. ОПЫТЫ СО ШТАМПАМИ

Использовались стержни $d_s = 4$ мм, $\bar{h}_s = 0,2$; $\bar{l}_s = 1, 2, 3, 4$; при $\bar{s} = 0,07; 0,11; 0,22; 0,36$. Нагрузки передавались через штамп $D = 150$ мм. По результатам экспериментов (рис. 2.16) видно, что с уменьшением шага относительная несущая способность возрастала, максимальные значения F_{us} наблюдались при относительной длине стержней $\bar{l}_s \geq 2$.

Повышение несущей способности армированного основания отмечено более чем в два раза по сравнению с неармированным основанием.

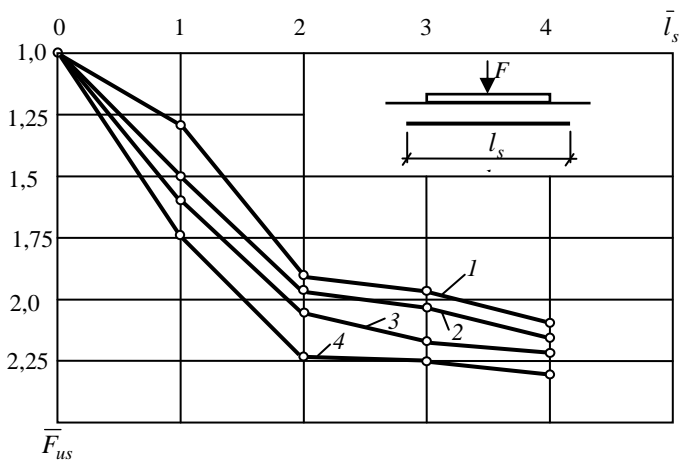


Рис. 2.16. Влияние относительного шага стержней и их длины на относительную несущую способность основания при \bar{s} :

1 – 0,36; 2 – 0,22; 3 – 0,11; 4 – 0,07

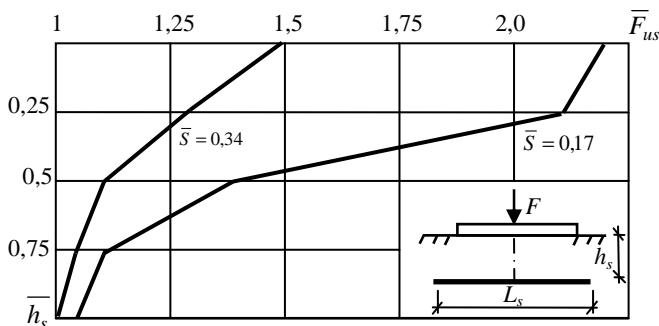


Рис. 2.17. Зависимость относительной несущей способности от расстояния до арматуры

При армировании основания штампа диаметром $D = 120$ мм стержнями диаметром 8 мм при относительной длине $l_s = 3$ расстояние от подошвы последовательно увеличивали. С уменьшением расстояния между стержнями в два раза величины разрушающих нагрузок возрастали до двух и более раз. Максимум несущей способности зафиксирован при глубине арматуры $\bar{h}_s = 0,25D$. Результаты опытов представлены на рис. 2.17.

При армировании основания штампа диаметром $D = 150$ мм отдельными стержнями $d_s = 5$ мм длиной $\bar{l}_s = 2,3$ с шагом 40 мм последовательно изменяли расстояние от подошвы штампа до арматуры. На расстоянии больше 0,5 от размера штампа влияние арматуры не сказывалось на несущей способности. Относительная несущая способность составила 1,25...1,6 с увеличением по мере приближения к подошве модели.

Использование рифленой арматуры диаметром 8 мм, относительной длиной $\bar{l}_s = 2$ при том же шаге, что и для стержней 5 мм, подтвердило предыдущие результаты при центральной передаче нагрузки.

Для исследования влияния шага армирующих элементов на скорость развития осадок использовали металлические стержни длиной $l_s = 1,7D$, $d_s = 4$ мм; диаметр штампа $D = 175$ мм; плотность мелкозернистого песка в основании штампа $\rho = 1,62$ г/см³. Результаты испытаний приведены на рис. 2.18.

При внецентренной передаче $\bar{e}_0 = 0,5$ для штампа диаметром 200 мм основание армировали рифлеными стержнями диаметром 5 мм; $\bar{l}_s = 2$; $\bar{s} = 0,25$. Разрушающая нагрузка для армированного основания в 1,25–3 раза превышала то же значение для неармированного основания.

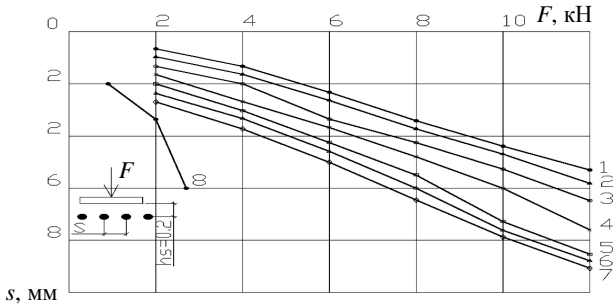


Рис. 2.18. Влияние шага стержней на развитие осадки:

1 – $s = 0,4D$; 2 – $s = 0,6D$; 3 – $s = 0,8D$; 4 – $s = 0,2D$; 5 – $s = 0,1D$;
6 – $s = D$; 7 – $s = 1,2D$; 8 – без армирования

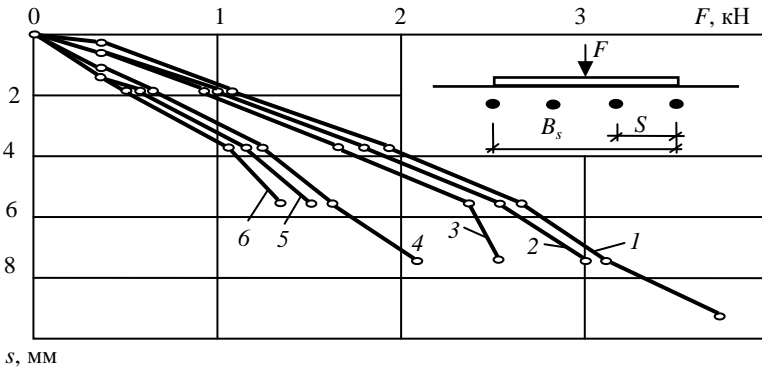


Рис. 2.19. Зависимость осадка–нагрузка:

при $\bar{l}_s = 3$ (1, 2, 3) и $\bar{l}_s = 1$ (4, 5, 6) при $\bar{s} :$
1 и 4 – 0,1; 2 и 5 – 0,2; 3 и 6 – 0,3

Длина горизонтально расположенного армирующего элемента оказывает большое влияние на скорость развития осадок. Результаты опытов со штампом $D = 125$ мм, $d_s = 3$ мм, $\bar{h}_s = 0,2$, $\bar{l}_s = 1; 3$; $\bar{s} = 0,1; 0,2; 0,3$ представлены на рис. 2.19.

С увеличением длины \bar{l}_s от 1 до 3 скорость развития деформаций уменьшается почти в два раза. Эти результаты подтверждены экспериментами, проведенными со штампом $D = 150$ мм, при $d_s = 4$ мм, $\bar{l}_s = 1,5; 2; 3; 4$; при $\bar{s} = 0,1 \dots 0,3$. Отмечено, что максимальная скорость приращения несущей способности наблюдалась при $\bar{l}_s = 2 \dots 3$ (рис. 2.20).

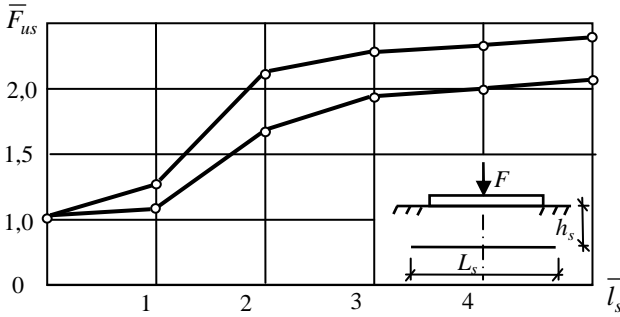


Рис. 2.20. Влияние размеров стержней с $s/d_s = 14$ (1) и $s/d_s = 3$ (2) на относительную величину разрушающей нагрузки

Одним из важнейших факторов влияния на несущую способность армогрунта является плотность основания. Так с увеличением плотности песчаного грунта с 1,55 до 1,64 г/см³ несущая способность основания армированного стержнями $d_s = 4$ мм, $s = 40$ мм, $\bar{l}_s = 2$ ($D = 100$ мм) увеличивалась в 1,5–2 раза по сравнению с неармированным основанием (табл. 2.6). Оптимальное относительное расстояние от подошвы штампа до арматуры составило $\bar{h}_s = 0,2$.

В следующей серии экспериментов нагрузка на штамп $D = 150$ мм передавалась с относительным эксцентриситетом $\bar{e}_0 = 0; 0,25; 0,5; 0,75$. Основание армировалось стержнями $d_s = 8$ мм, $L_s = 300$ мм, $s = 40$ мм. Максимальное значение относительной несущей способности при $\bar{e}_0 = 0$, $\bar{F}_{us} = 1,93$; $\bar{e}_0 = 0,25$; $\bar{F}_{us} = 2,31$; $\bar{e}_0 = 0,5$; $\bar{F}_{us} = 2,6$; $\bar{e}_0 = 0,75$; $\bar{F}_{us} = 3$; (табл. 2.7).

С увеличением эксцентриситета приложения нагрузки эффект армирования возрастает, особенно при совпадении оси нагрузки с осью арматуры.

2.6. Зависимость относительной несущей способности от плотности основания и расстояния до арматуры

\bar{h}_s	Относительная несущая способность \bar{F}_{us} при плотности ρ , г/см ³			
	1,55	1,58	1,61	1,64
0	1,1	1,4	1,5	1,6
0,2	1,3	1,6	1,75	2,2
0,4	1,1	1,3	1,4	1,5

2.7. Влияние смещения стержней на относительную несущую способность

e_0	e_s	F_u , кН	F_{us} , кН	\bar{F}_{us} , кН
0	0	5,2	9,9	1,93
0,25	0	3,2	5,0	1,54
0,5	0	2,0	3,0	1,5
0,75	0	0,8	1,1	1,4
0	0,25	5,2	9,4	1,8
0,25	0,25	3,2	7,4	2,31
0,5	0,25	2,0	4,2	2,1
0,75	0,25	0,8	1,8	1,8
0	0,5	5,2	8,9	1,7
0,25	0,5	3,2	6,8	2,3
0,5	0,5	2,0	5,2	2,6
0,75	0,5	0,8	2,0	2,3
0	0,75	5,2	6,2	1,19
0,25	0,75	3,2	5,2	1,63
0,5	0,75	2,0	3,6	1,83
0,75	0,75	0,8	2,4	3,0

2.2.2. ОПЫТЫ С МОДЕЛЯМИ

Использовалась модель $D=75$ мм с относительным заглублением: $\bar{\lambda} = H/D = 2$, нагрузка передавалась центрально вертикально и наклонно с углом наклона к вертикали $\alpha = 15^\circ$. В качестве арматуры использовались стержни $\bar{d}_s = d_s/D = 0,11$, где d_s – диаметр стержней. Стержни располагались с относительным шагом $\bar{s} = 0,4$, где $\bar{s} = s/D$ – относительный шаг. Относительная длина стержней $\bar{l}_s = l_s/D = 3$. Расстояние от арматуры до модели $\bar{h}_s = h_s/D = 0; 0,5; 1; 1,5; 2$. Стержни располагались горизонтально и вертикально (рис. 2.21) в сторону предполагаемого выпора грунта.

Разрушающая нагрузка при горизонтальном расположении стержней оказалась в 1,3 выше, чем при вертикальном, и в 2,2 раза выше, чем для неармированного основания, вследствие вовлечения в работу большего объема грунта.

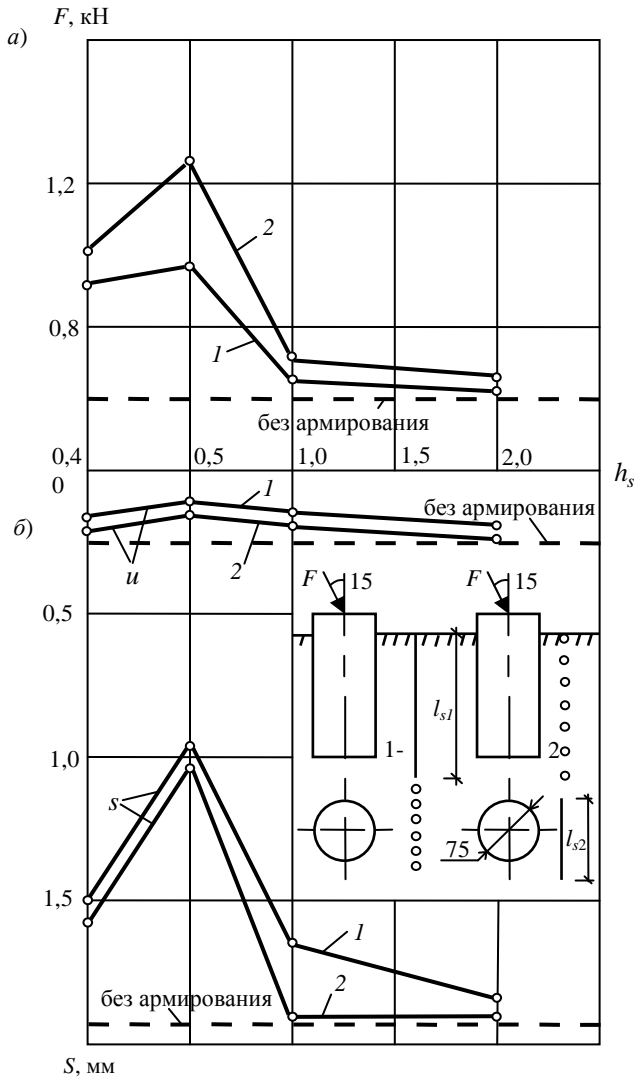


Рис. 2.21. Зависимость величин разрушающих нагрузок (а), горизонтальных перемещений и осадки модели (б) от расстояния до вертикально (1) и горизонтально (2) расположенных стержней

Максимальные величины горизонтальных перемещений в армированном основании уменьшились до двух раз по сравнению с неармированным.

2.3. АРМИРОВАНИЕ СТЕРЖНЯМИ МАЛЫХ РАЗМЕРОВ

В первой серии экспериментов использовали коротышки стержневой арматуры длиной 30, 45, 60, 90 мм. Изменяли диаметр стержней 4, 6, 8 и 10 мм и процент армирования – 100, 70, 40 и 25% (табл. 2.8). За 100% принимали полную длину стержней 1,8 м. Использовался штамп $D = 150$ мм. В качестве основания принимали песок при постоянной влажности 5% и плотности $1,55 \text{ г/см}^3$. Чтобы изменить процент армирования, меняли шаг и количество стержней.

Эффект армирования оценивали по удельной несущей способности – отношению несущей способности армированного основания к объёму арматуры.

Несущая способность неармированного основания составила 2,1 кН. Результаты экспериментов представлены на рис. 2.22 и в табл. 2.9.

2.8. Значения объёма арматуры в зависимости от процента армирования

% армирования	Объём арматуры при диаметре стержней, мм			
	4	6	8	10
100	22,6	50,9	90,5	141,4
70	15,8	35,6	63,3	99
40	9,1	20,4	36,2	56,6
25	5,7	12,7	22,6	35,2

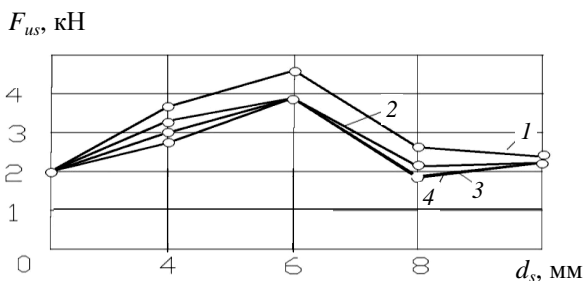


Рис. 2.22. Влияние длины и диаметра коротышек на несущую способность основания при постоянном шаге $\bar{s} = 0,11$:

1 – 90 мм; 2 – 60 мм; 3 – 45 мм; 4 – 30 мм

2.9. Влияние геометрических характеристик арматуры на удельную несущую способность основания

Длина l_s , мм	Диаметр d_s , мм	Относи- тельный шаг \bar{s}	Количество стержней, рядов	Объём арматуры, см ³	Удельная несущая способность F_{us} / V_s , кН/см ³
90	10	0,11	20/2	141,4	0,017
		0,16	14/2	99	0,027
		0,33	8/2	56,6	0,058
		0,25	5/1	35,3	0,119
60	10	0,11	30/3	141,4	0,016
		0,17	21/3	99	0,033
		0,2	12/2	56,6	0,073
		0,33	8/2	35,3	0,146
45	10	0,11	40/4	141,4	0,016
		0,125	28/4	99	0,036
		0,25	16/4	56,6	0,074
		0,5	10/3	35,3	0,127
30	10	0,11	60/6	141,4	0,016
		0,1	42/4	99	0,039
		0,2	24/4	56,6	0,084
		0,33	15/4	35,3	0,07
90	8	0,11	20/2	30,5	0,036
		0,16	14/2	63,3	0,057
		0,33	8/2	36,2	0,091
		0,25	5/1	22,6	0,159
60	8	0,11	30/3	30,5	0,068
		0,16	21/3	63,3	0,057
		0,2	12/2	36,2	0,099
		0,33	8/1	22,6	0,173
45	8	0,11	40/4	30,5	0,059
		0,13	28/4	63,3	0,052
		0,25	16/4	36,2	0,091
		0,5	10/4	22,6	0,159
30	8	0,11	60/6	30,5	0,06
		0,1	42/4	63,3	0,052
		0,2	24/4	36,2	0,107
		0,33	15/4	22,6	0,173

Длина l_s , мм	Диаметр d_s , мм	Относи- тельный шаг \bar{s}	Количество стержней, рядов	Объём арматуры, см ³	Удельная несущая способность F_{us} / V_s , кН/см ³
90	6	0,11	20/2	51	0,088
		0,16	14/2	35,6	0,143
		0,33	8/2	20,4	0,205
		0,25	5/1	12,7	0,354
60	6	0,11	33/3	51	0,076
		0,16	21/3	35,6	0,118
		0,2	12/2	20,4	0,206
		0,33	8/2	12,7	0,307
45	6	0,11	40/6	51	0,076
		0,13	28/3	35,6	0,101
		0,25	15/3	20,4	0,157
		0,5	10/3	12,7	0,283
30	6	0,11	60/6	51	0,076
		0,10	42/4	35,6	0,101
		0,2	24/4	20,4	0,191
		0,33	15/3	12,7	0,354
90	4	0,11	20/2	22,6	0,159
		0,16	14/2	15,8	0,209
		0,33	8/2	9,05	0,331
		0,25	5/1	5,7	0,509
60	4	0,11	30/3	22,6	0,146
		0,16	21/3	15,8	0,247
		0,2	12/2	9,05	0,431
		0,33	8/2	5,6	0,643
45	4	0,11	40/4	22,6	0,119
		0,13	28/3	15,8	0,171
		0,25	16/3	9,05	0,398
		0,5	10/3	5,6	0,531
30	4	0,11	60/6	22,6	0,133
		0,1	42/4	15,8	0,247
		0,2	24/4	9,05	0,398
		0,33	15/4	5,6	0,584

2.2.3. КОМПРЕССИОННЫЕ И СДВИГОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Компрессионные испытания

В первой серии экспериментов изменяли шаг и диаметр горизонтально расположенных металлических коротышей. Диаметр менялся от 0,5 до 3 мм, шаг 10, 20, 30 мм. Стержни имели переменную длину, так как их размещали равномерно по площади кольца компрессионного прибора. Неизменными параметрами оставались плотность ($\rho = 1,55 \text{ г/см}^3$) и влажность ($\omega = 11\%$).

Компрессионные испытания проводились по ГОСТ 12248–96. Нагрузка на рычаг прибора передавалась ступенями с шагом в 0,03 кН, что соответствовало шагу давления на грунт в 50 кПа (первая ступень давления – 25 кПа). Каждая ступень нагрузки выдерживалась до условного затухания деформаций (0,01 мм за час наблюдений).

Результаты испытаний при ориентированном расположении стержней приведены на рис. 2.23 и 2.24 для шага стержней 20 и 10 мм.

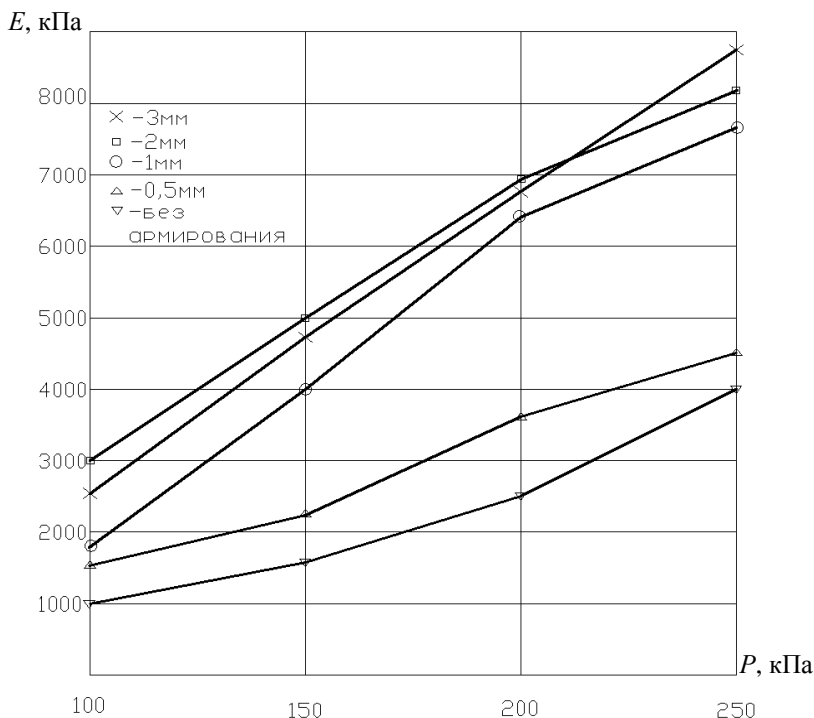


Рис. 2.23. Зависимость модуля деформации от давления при расположении стержней с шагом 20 мм

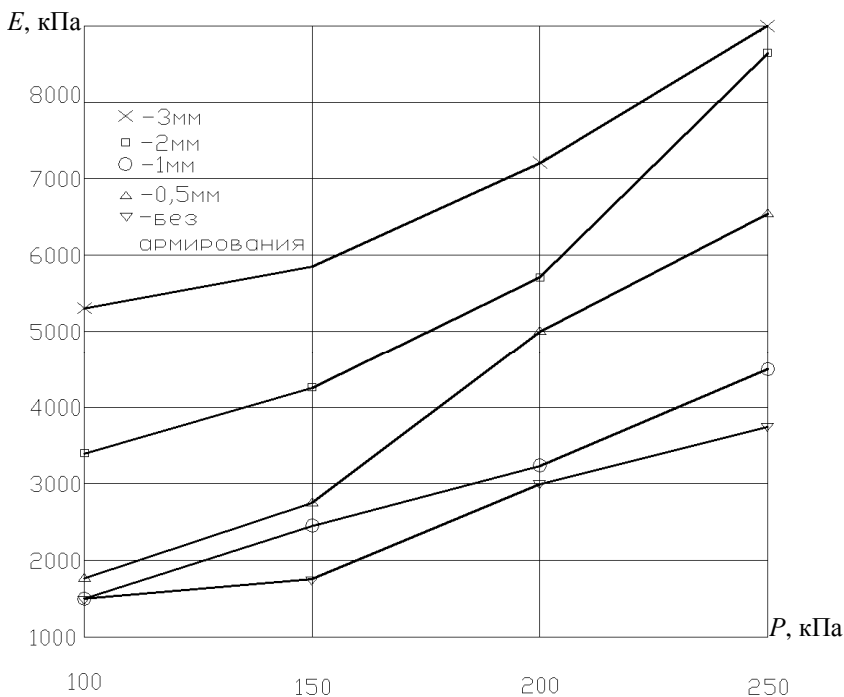


Рис. 2.24. Зависимость модуля деформации от давления при расположении арматуры с шагом 10 мм

Использование арматуры позволило увеличить значения модуля деформации в 2–2,5 раза. С увеличением диаметра стержней и уменьшением шага коэффициент стеснения поперечных деформаций возрастал, и, как следствие, снижались значения коэффициента пористости.

Деформативные параметры армогрунта при одноосном сжатии эквивалентны неармированному, но более жёсткому грунту. Причём жёсткость армированного образца обеспечивается сопротивлением контакта «грунт–арматура», препятствующему свободному боковому расширению.

Использование более коротких включений, полученных делением стержней на две равные части, т.е. расположение их с разрывом давало схожий эффект (рис. 2.25).

Испытания проводились по ГОСТ 12248–96. Касательная нагрузка передавалась ступенями, значения которых составляли 10% от значения нормальной нагрузки, при которой производится срез [13].

E , кПа

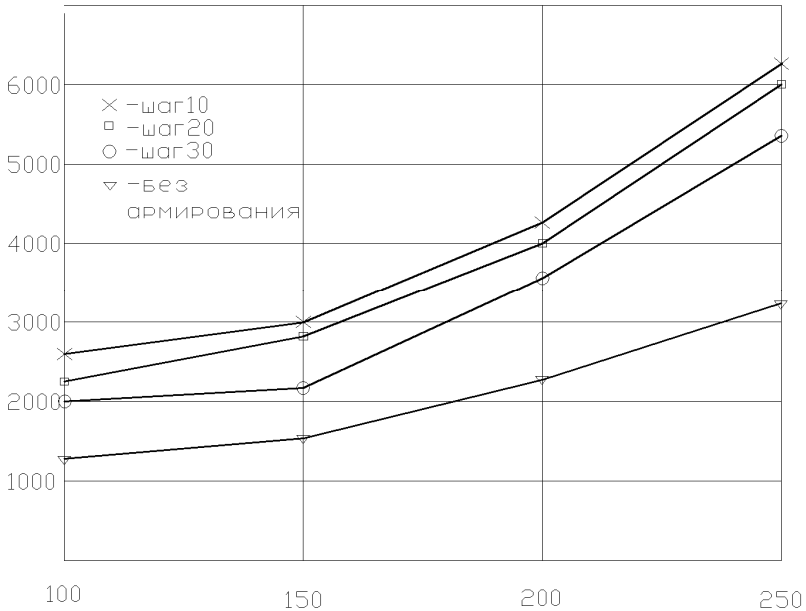


Рис. 2.25. Зависимость модуля деформации от давления при прерывистом расположении стержнем диаметром 2 мм

Использовали стержни диаметром 0,5...3 мм, расположенные с шагом 10...30 мм.

Сдвиговые испытания

В испытаниях без арматуры были получены следующие значения характеристик:

$$\operatorname{tg}\varphi = (3 \cdot (0,1 \cdot 0,1 + 0,15 \cdot 0,2 + 0,225 \cdot 0,3) - (0,1 + 0,15 + 0,225) \times (0,1 + 0,2 + 0,3)) / (3 \cdot (0,1^2 + 0,2^2 + 0,3^2) - (0,1 + 0,2 + 0,3)^2) = 0,625;$$

$$\varphi = 32^\circ;$$

$$c = ((0,1 + 0,15 + 0,225) \cdot (0,1^2 + 0,2^2 + 0,3^2) - (0,1 + 0,2 + 0,3) \times (0,1 \cdot 0,1 + 0,15 \cdot 0,2 + 0,225 \cdot 0,3)) / (3 \cdot (0,1^2 + 0,2^2 + 0,3^2) - (0,1 + 0,2 + 0,3)^2) = 0,0333 \text{ МПа.}$$

Максимальные значения прочностных характеристик наблюдались при армировании стержнями диаметром 3 мм, значения сцепления и угла внутреннего трения увеличились в 1,25 и 1,29 раза, соответственно, по сравнению с неармированным основанием (рис. 2.26) [8].

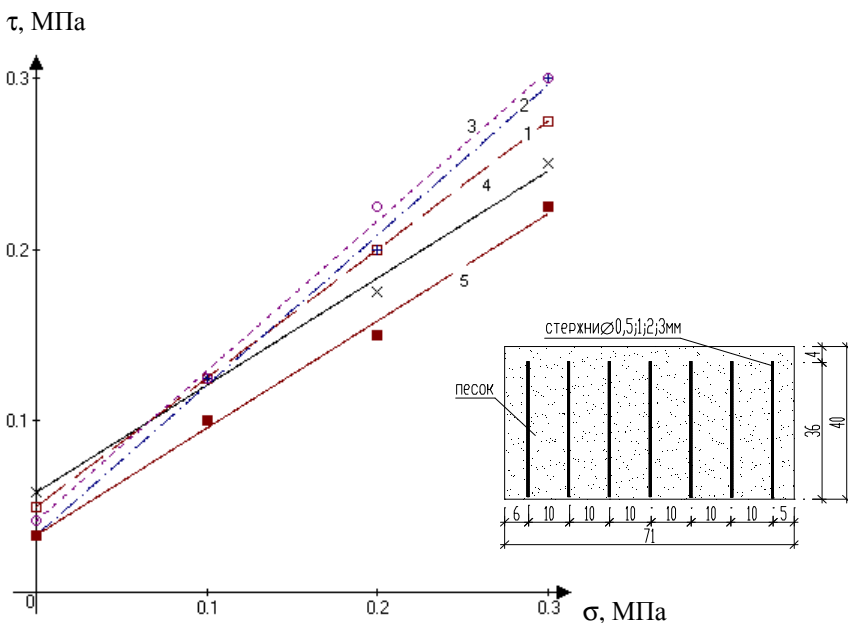


Рис. 2.26. Зависимость напряжений среза от вертикальных напряжений при шаге стержней 10 мм и диаметре:

1 – 1 мм ($C = 0,05$ МПа, $\varphi = 36,87$); 2 – 2 мм ($C = 0,033$ МПа, $\varphi = 41,21$);
 3 – 3 мм ($C = 0,0417$ МПа, $\varphi = 41,19$); 4 – 0,5 мм ($C = 0,0583$ МПа, $\varphi = 32,00$);
 5 – неармированное основание

2.4. ПОЛОСОВОЕ АРМИРОВАНИЕ

В первой серии экспериментов исследовали влияние ширины полос, относительной глубины их расположения, длины, шаг на несущую способность основания. Основанием штампа диаметром $D = 120$ мм служил мелкий однородный песок постоянной плотности $1,52$ г/см³, при относительной влажности $w = 0,05$ (табл. 2.10 и 2.11).

Значения разрушающей нагрузки (кН) для полос пластика и резины при одинаковой толщине – 5 мм приведены в табл. 2.10 и 2.11. Разрушающая нагрузка на неармированное основание составила 1,62 кН.

С увеличением шага эффект армирования уменьшался. Оптимальное относительное расстояние до полос находилось в пределах $0 \dots 0,2D$. С увеличением относительной длины несущая способность возрастала до двух раз (для полос пластика). Армирование резиновыми полосами вследствие недостаточной жёсткости менее эффективно. Увеличение ширины полос практически не влияет на несущую способность.

2.10. Зависимость несущей способности от заглубления, относительной длины и ширины полос пластика

b_s		0,1			0,2			0,4		
l_s	s/h_s	0	0,2	0,4	0	0,2	0,4	0	0,2	0,4
0,5	0	2,2	2,1	2,0	2,3	2,02	2,0	2,4	2,08	2,04
	0,2	2,1	2,0	1,92	2,42	2,1	2,1	2,54	2,2	1,98
	0,4	1,98	1,96	1,94	2,25	2,12	2,06	2,4	2,08	2,06
1	0	2,26	2,16	2,1	3,06	2,34	2,1	3,06	2,4	2,04
	0,2	2,34	2,28	2,22	2,52	2,22	1,98	3,0	2,8	2,1
	0,4	2,30	2,26	2,32	2,28	1,98	1,92	2,72	2,28	2,0
2	0	2,35	2,2	2,1	3,15	2,84	2,05	3,84	3,40	3,06
	0,2	2,4	2,30	2,15	3,2	1,96	2,1	3,76	3,2	2,94
	0,4	2,2	2,25	1,96	2,8	1,8	1,9	2,88	2,7	2,4

2.11. Зависимость несущей способности от заглубления, относительной длины и ширины полос резины

b_s		0,1			0,2			0,4		
l_s	s/h_s	0	0,2	0,4	0	0,2	0,4	0	0,2	0,4
0,5	0	1,8	1,74	1,62	2,04	1,8	1,72	2,22	1,8	1,74
	0,2	1,68	1,68	1,62	2,22	1,86	1,7	1,92	1,82	1,84
	0,4	1,62	1,68	1,62	1,74	1,68	1,68	1,68	1,76	1,76
1	0	1,9	1,86	1,86	2,1	1,84	1,74	1,86	1,86	1,86
	0,2	1,9	1,86	1,74	1,98	1,92	1,98	1,98	2,34	1,8
	0,4	1,86	1,86	1,68	1,82	1,76	1,68	1,84	1,74	1,74
2	0	1,92	1,98	1,92	2,28	1,92	1,86	2,34	2,22	1,92
	0,2	1,86	1,86	1,8	1,98	1,8	1,92	2,46	2,18	1,88
	0,4	1,86	1,86	1,8	1,86	1,8	1,8	1,8	1,86	1,82

В следующей серии экспериментов использовался штамп $D = 175$ мм. В качестве основания принимали песок при постоянной влажности 5% и плотности $1,62$ г/см³. Использовали полосы шириной 35 мм из оргстекла,

войлока, древесноволокнистых плит, металла. Толщина полос была постоянной 4 мм, также как и длина $l_s = 1,7D$.

Целью этой серии являлось исследование влияния полосового армирования на модуль деформации, который определялся по результатам штамповых испытаний

$$E = (1 - \nu^2) \omega D \Delta p / \Delta s,$$

где ν – коэффициент Пуассона, для песка 0,3; $\omega = 0,8$ коэффициент, зависящий от формы штампа.

Результаты экспериментов для разного материала полос при глубине заложения арматуры $h_s = 0,2D$, при шаге полос $s = 0$ приведены на рис. 2.27.

Значения модуля деформаций для армированных оснований были близкими и превышали эти значения для неармированного основания в 3,2–3,5 раза.

Влияние глубины расположения полос на модуль деформаций показано на рис. 2.28 для полос из ДВП при шаге полос $s = 0$.

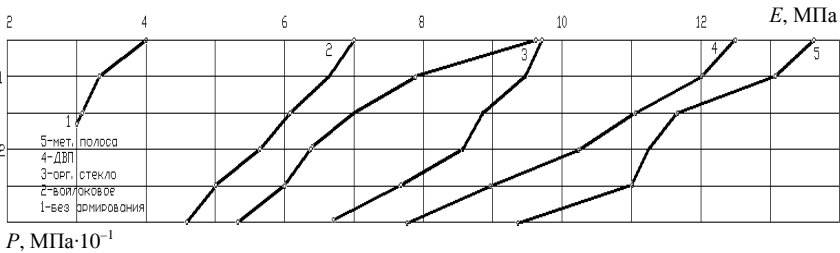


Рис. 2.27. Влияние материала полос на модуль общих деформаций

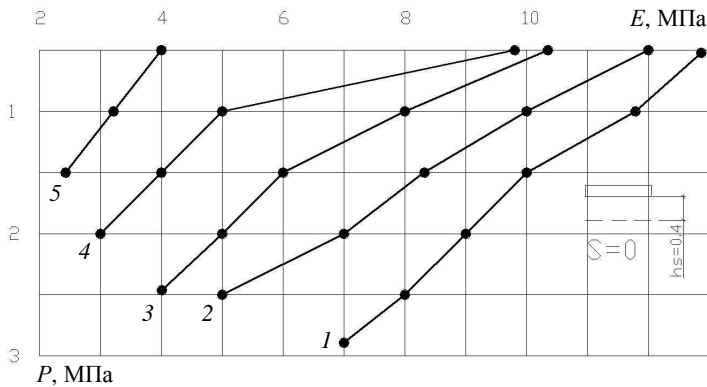


Рис. 2.28. Влияние относительного расстояния от подошвы штампа до полос, h_s :
1 – 0,2; 2 – 0,4; 3 – 0,6; 4 – 0,8; 5 – без армирования

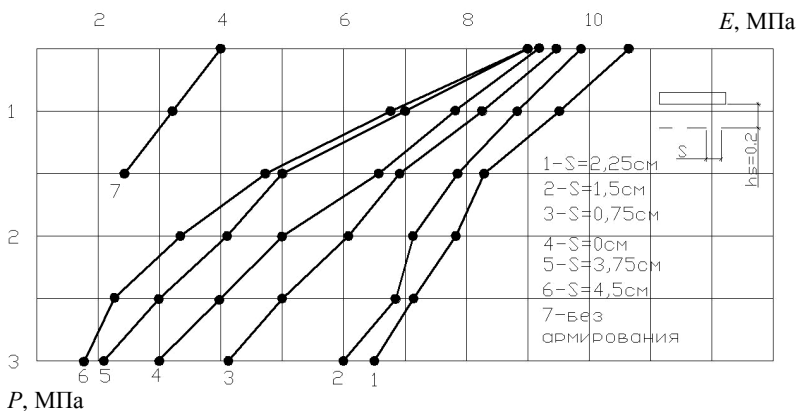


Рис. 2.29. Зависимость модуля общих деформаций от шага полосового армирования

Влияние шага полосового армирования на деформационные характеристики грунтов показано на рис. 2.29. Оптимальным признан шаг $s = 2,25 \text{ см} = 0,12D$. Использовались полосы из оргстекла при глубине расположения $h_s = 0,2D$.

Влияние шероховатости контактной поверхности оценивали на металлических полосах шириной 35 мм и длиной $3d$ ($D = 125 \text{ мм}$). Помещали их на глубине $0,2D$ с шагом $0,3D$. Для создания шероховатости поверхности к ним наклеивали мелкий однородный песок. Влияние шероховатости на величину разрушающей нагрузки представлено на рис. 2.30. При покрытии полос песком с обеих сторон несущая способность возрастала до 1,5 раз.

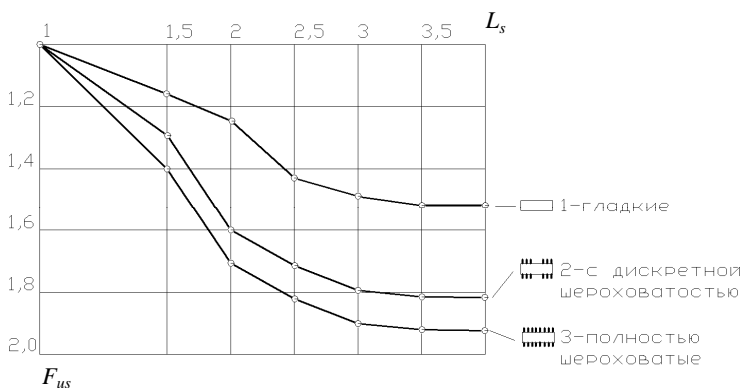


Рис. 2.30. Влияние шероховатости контактной поверхности полос на относительную несущую способность

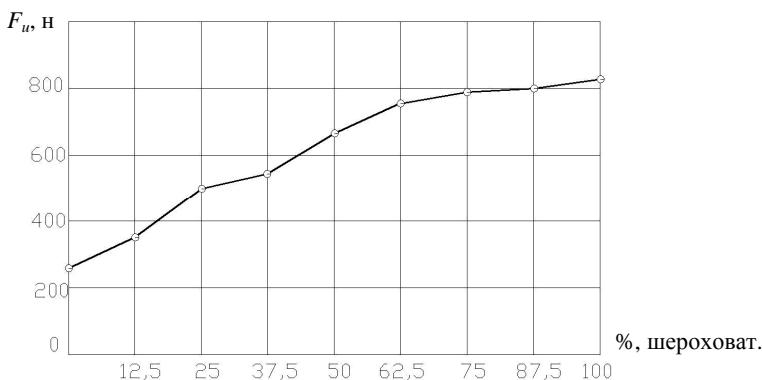


Рис. 2.31. Влияние площади оклеенной поверхности на выдергивающую нагрузку

Влияние шероховатости на силу трения по контакту арматуры с грунтом оценивали опытами на выдергивание полос из оргстекла размерами 400×200 мм, толщиной 5 мм, шероховатость поверхности обеспечивалась оклейкой песком на эпоксидном клее.

Испытания проводились в лотке с размерами $1000 \times 1000 \times 700$ мм. Значение выдергивающей нагрузки определяли на разрывной машине типа ИР 5057-50 с силоизмерительным центром.

Как видно по рис. 2.31, зависимость между выдергивающей силой и шероховатостью практически прямая, значение выдергивающей нагрузки для полностью оклеенного оргстекла в 3,6 раза выше, чем для гладкого.

2.5. ИНЪЕКЦИОННОЕ ЗАКРЕПЛЕНИЕ

2.5.1. ДВУХСЛОЙНОЕ ОСНОВАНИЕ

Проводились лотковые испытания несущей способности двухслойного основания, верхний слой которого (в первой серии опытов 30 см, во второй 10 см) был представлен распределительной подушкой из мелкого песка ($\rho = 1,51$ г/см³, $\omega = 5,5\%$), нижний (в первой серии 30 см, во второй 50 см) имитировал слабое основание. Для нижнего слоя использовали древесные опилки ($\rho = 0,5$ г/см³, $\omega = 50\%$).

Для повышения несущей способности основания в первой серии опытов использовали инъекции цементным раствором на глубину $1/4$ и $1/2D$ (D – диаметр подошвы модели фундамента). Инъекции проводили с двух или трёх сторон. Угол наклона инъекций 30 , 45 и 60° . По окончании твердения раствора вертикальную нагрузку на основание передавали с помощью рычага через штамп $D = 100$ мм. Изменяли объём цементного раствора, угол наклона и глубину инъекций. Схема инъекцирования показана на рис. 2.32.

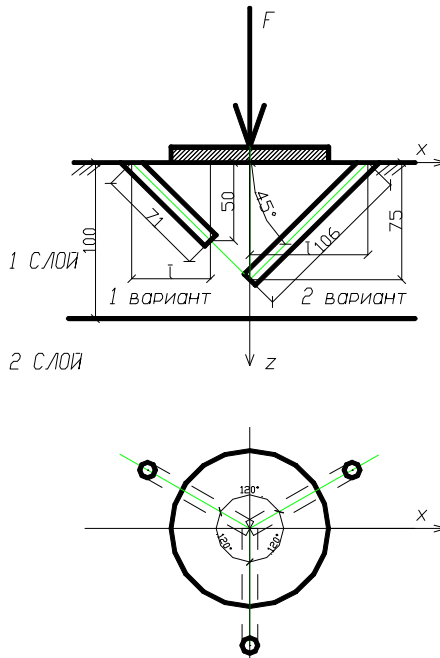


Рис. 2.32. Схема инъекцирования

Эффективность армирования оценивали по значениям:

а) коэффициента относительных деформаций при фиксированной нагрузке

$$k_s = s / s_0 ,$$

где s – осадка армированного; s_0 – то же, неармированного основания при равных значениях нагрузок;

б) коэффициенту армирования

$$k_{\mu} = F_{us} / \mu_s ,$$

где μ_s – процент армирования основания,

$$\mu_s = V_s / V ,$$

V_s – объём арматуры; V – объём основания, включённого в работу, условно определялся как $V = 2D \cdot 2D \cdot D$;

в) коэффициент относительной несущей способности основания

$$k_F = F_{us} / F_u ,$$

где F_{us} – несущая способность армированного основания – разрушающая нагрузка; F_u – то же, для неармированного.

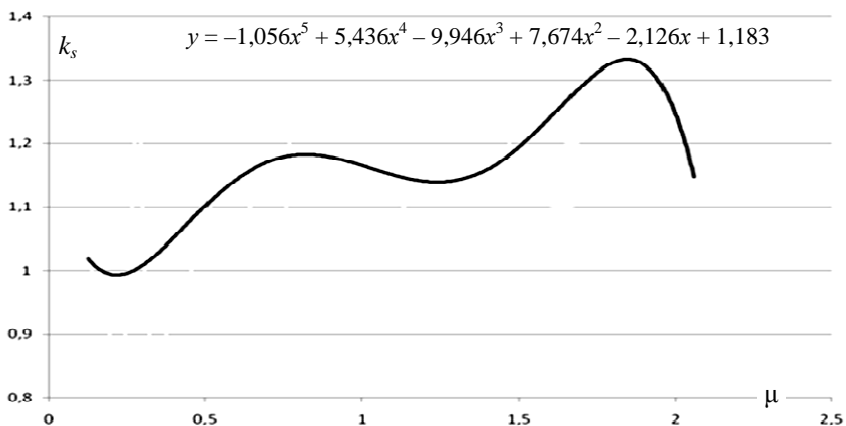


Рис. 2.33. Зависимость $k_s = s/s_0$ от процента армирования μ , %

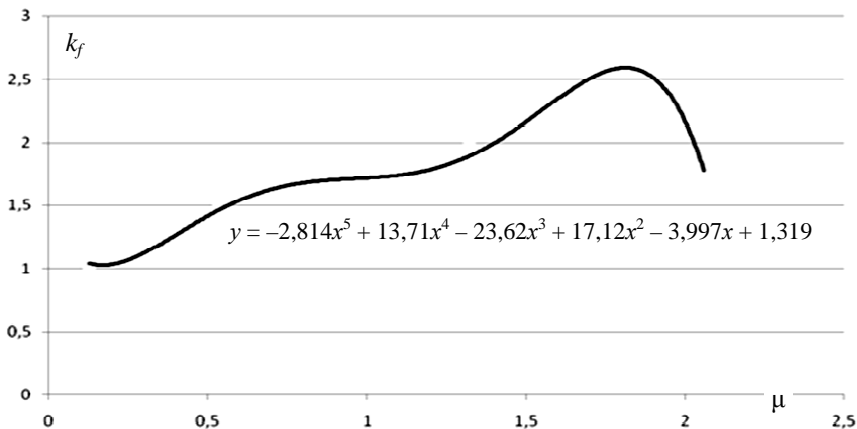


Рис. 2.34. Зависимость $k_f = F_{us}/F_0$ от процента армирования μ , %

Выяснилось, что деформативность армированного основания ниже неармированного (рис. 2.33), а несущая способность выше (рис. 2.34). Значительное влияние на развитие осадок оказывает угол наклона инъекций (значения k_s при инъектировании под углом 30, 45 и 60° на глубину $1/4D$, соответственно, равнялись $k_s = 0,49; 0,55; 0,68$ при $p = 0,17$ МПа, $\mu = 0,903; 1,07; 1,57$), и объём цементного раствора ($k_s = 0,53/0,41; 0,71/0,45; 0,7/0,47$).

Несущая способность увеличивалась до 1,5 раз в зависимости от угла наклона и объёма инъектируемого раствора.

Результаты экспериментов приведены в табл. 2.12 (значения осадок определялись при $P = 0,17$ МПа). Увеличение глубины расположения зоны усиления с $1/4D$ до $1/2D$ снижает скорость развития осадок в два раза независимо от толщины слабого слоя. Относительные размеры деформаций при меньшей толщине слабого слоя ниже, так как во второй серии экспериментов в пределы сжимаемой зоны попадали и слабый слой.

2.12. Результаты испытаний оснований со слабым нижним слоем, усиленным инъекционными сваями

n_p	\bar{l}	$\beta, ^\circ$	$F_{us}, \text{кН}$	$s, \text{мм}$	$\mu, \%$	k_s	k_f	k_μ
$\bar{h} = 30/30 = 1 \dots s_0 = 5,05 \text{ мм}, F_{us,0} = 1,35 \text{ кН}$								
2	0,25	30	1,65	2,47	0,90	0,49	1,22	1,83
		45	1,50	2,79	1,12	0,55	1,11	1,35
		60	1,50	3,46	1,57	0,68	1,11	0,95
	0,5	30	1,80	2,69	1,36	0,53	1,33	1,32
		45	1,65	3,58	1,66	0,71	1,22	0,99
		60	1,50	3,52	2,35	0,70	1,11	0,64
3	0,25	30	1,50	4,01	1,36	0,79	1,11	1,10
		45	1,35	4,43	1,65	0,85	1,00	0,82
		60	1,35	4,60	2,35	0,91	1,00	0,57
	0,5	30	1,80	2,05	2,04	0,40	1,33	0,88
		45	1,50	2,23	2,50	0,44	1,11	0,60
		60	1,65	2,38	3,53	0,47	1,22	0,47
$\bar{h} = 10/50 = 0,2 \dots s_0 = 5,95 \text{ мм}, F_{us,0} = 0,675 \text{ кН}$								
2	0,25	30	0,75	5,29	0,90	0,89	1,11	1,10
		45	0,75	5,08	1,12	0,85	1,11	0,82
		60	0,75	4,42	1,57	0,74	1,11	0,57
	0,5	30	1	2,77	1,36	0,46	1,48	0,88
		45	1	2,46	1,66	0,41	1,48	0,60
		60	0,85	3,71	2,35	0,62	1,26	0,47
3	0,25	30	0,75	3,75	1,36	0,63	1,11	0,55
		45	0,82	2,34	1,65	0,39	1,22	0,50
		60	0,75	4,01	2,35	0,67	1,11	0,32
	0,5	30	1,27	2,59	2,04	0,43	1,89	0,62
		45	1,12	2,48	2,50	0,41	1,67	0,45
		60	1,05	3,01	3,53	0,50	1,56	0,30

2.5.2. УСИЛЕНИЕ ИНЪЕКЦИЯМИ ОСНОВАНИЙ, СОДЕРЖАЩИХ ВКЛЮЧЕНИЯ СЛАБОГО ГРУНТА

Ослабление основания моделировали линзами в виде параллелепипеда мощностью, равной диаметру штампа d_{st} на всю длину лотка. Основной, более прочный грунт был сформирован из мелкого песка ($\rho = 1,6 \text{ г/см}^3$, $\omega = 0,07$), линзы слабого грунта были подготовлены из влажных древесных опилок хвойных пород ($\rho = 0,5 \text{ г/см}^3$; $\omega = 0,5$).

При обработке результатов использовали относительные характеристики: $\bar{h} = h/d_{st}$; $\bar{a} = a/d_{st}$; $\bar{e} = e/d_{st}$: h – глубина залегания линзы (расстояние от нижней плоскости штампа до верхней плоскости слабого грунта); e – эксцентриситет оси линзы относительно оси штампа; a – ширина линзы. Ранее было выяснено, что наибольшее влияние линзы отмечено при $\bar{h} = 0,5$, $\bar{e} = 0,5$ (рис. 2.35, а). Это вызвано тем, что под краями штампа располагаются наибольшие значения сдвиговых (касательных) напряжений.

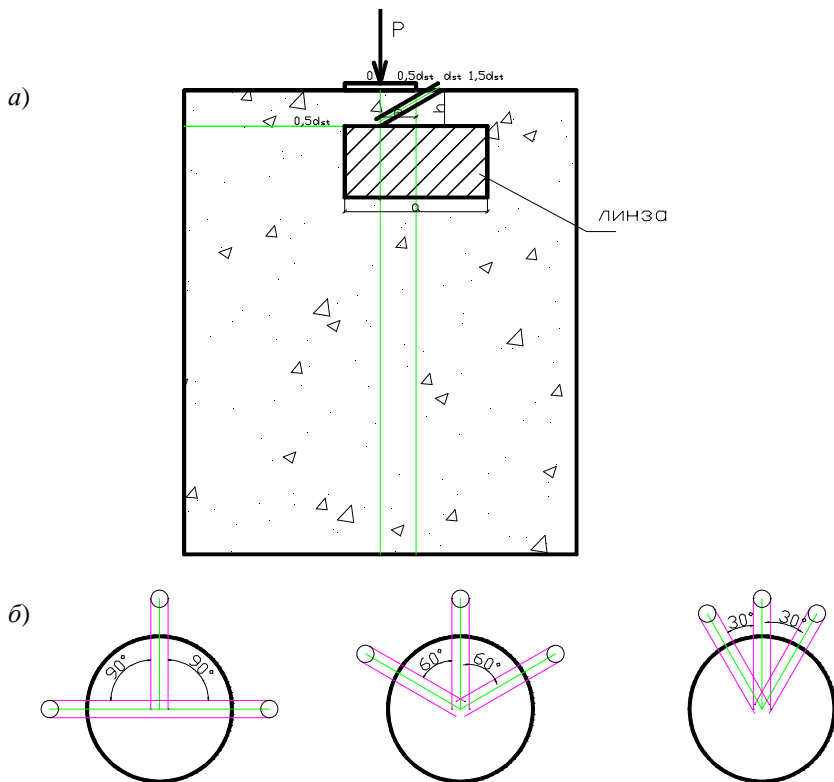


Рис. 2.35. Расположение линзы в основании (а), схемы инъекций (б)

Для данного расположения линзы была проведена серия испытаний по усилению основания при помощи инъекций цементно-песчаным раствором. Угол наклона инъекций 30° . После завершения твердения раствора вертикальную нагрузку на основание передавали через штамп $D = 125$ мм.

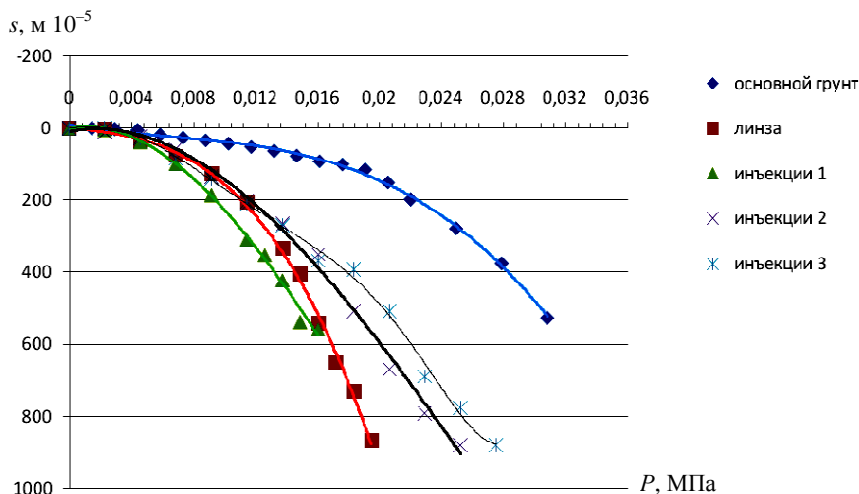


Рис. 2.36. График зависимости осадки от давления

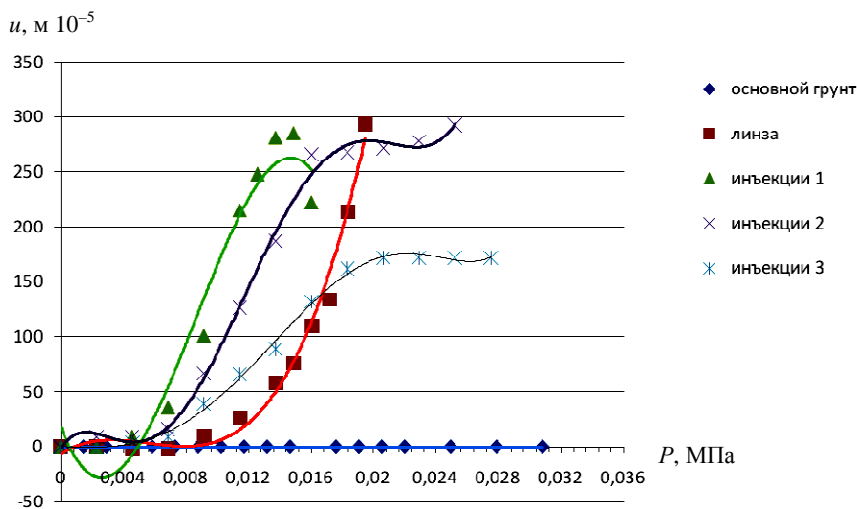


Рис. 2.37. График зависимости горизонтальных перемещений от давления

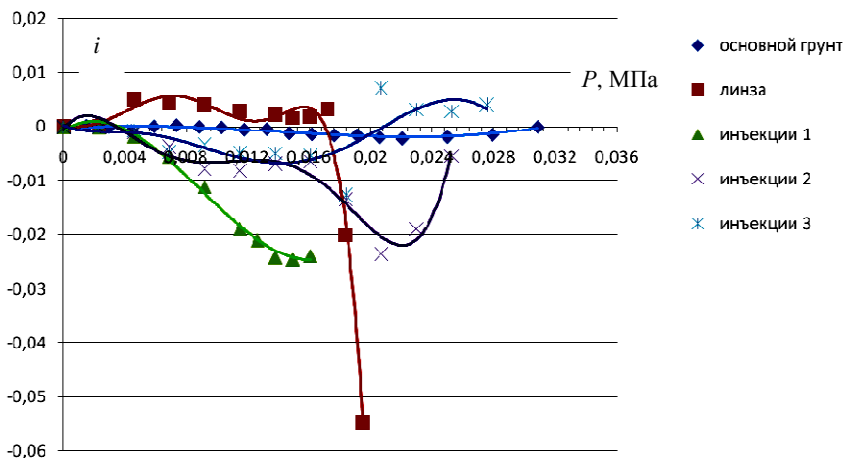


Рис. 2.38. График зависимости крена от давления

К рассмотрению было принято три варианта расположения инъекций (рис. 2.35, б). За изменяемый параметр принят угол между инъекциями – 30, 60 и 90°.

Деформативные характеристики основания улучшены на 20...50%. Усиление инъецированием по схеме 2 даёт наибольший эффект относительно горизонтальных перемещений, по схеме 3 – относительно горизонтальных перемещения и крена.

По мере уменьшения угла между инъекциями при равном расходе раствора несущая способность основания увеличивается, деформативность уменьшается.

Графики зависимостей осадки, горизонтальных перемещений и крена от давления приведены на рис. 2.36 – 2.38.

2.6. ДИСПЕРСНОЕ АРМИРОВАНИЕ

Основанием штампа диаметром $D = 120$ мм служил мелкий однородный песок постоянной плотности $1,52 \text{ г/см}^3$, при относительной влажности $w = 0,05$ (табл. 2.10 и 2.11).

Для армирования использовали керамзит и щебень при максимальном диаметре частиц 40 мм. При испытаниях изменяли толщину слоя – 1; 2; 3; 4 см; относительное расстояние от подошвы штампа до жёсткого материала $\bar{h}_s = h_s / D = 0; 0,2; 0,4$ и площадь включений – отношение площади штампа к площади дисперсного армирования – 0,5; 1; 2. Разрушающая нагрузка на неармированное основание составила 1,62 кН.

Результаты экспериментов представлены на рис. 2.39 и 2.40. Создание под подошвой фундамента более жёсткой области приводит к увели-

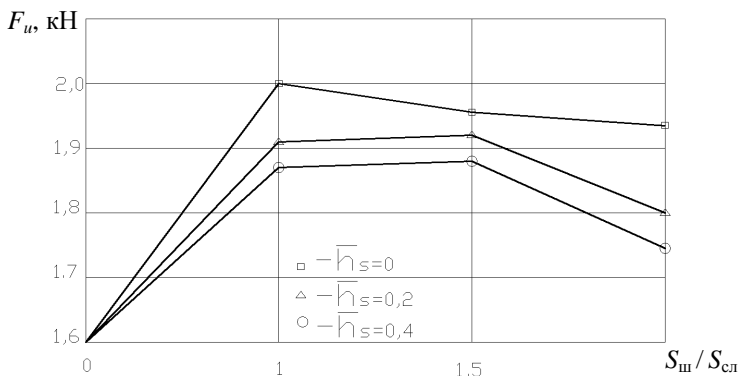


Рис. 2.39. Влияние площади включений и расстояния до слоя керамзита на несущую способность основания

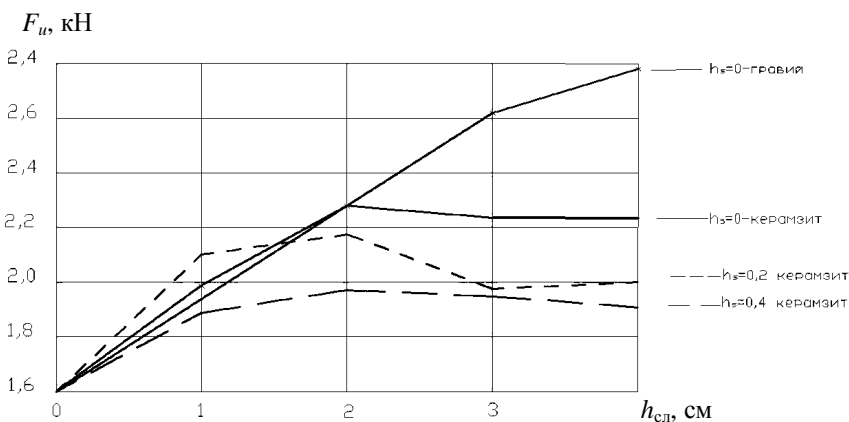


Рис. 2.40. Влияние толщины слоя включений на несущую способность основания

чению прочности основания, трансформации контактных напряжений, уменьшению крайних ординат и повышению средних.

Значения осадки на армированном основании меньше в 1,3–1,5 раза при тех же значениях нагрузок. Несущая способность в 1,4 (керамзит) – 1,7 (щебень) раза выше. Оптимальное отношение площади штампа к площади включений – 1. Оптимальное расположение – под подошвой штампа или на расстоянии $0,2D$.

С увеличением толщины слоя керамзита значения несущей способности изменялись незначительно. Оптимальные значения – толщина слоя – 1...2 см при соотношении $S_{st}/S_s = 1$.

3. АРМИРОВАНИЕ ПЛОСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

3.1. ВЛИЯНИЕ РАССТОЯНИЯ ДО АРМИРУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ НА НЕСУЩЮЮ СПОСОБНОСТЬ ОСНОВАНИЯ

В опытах использовали штампы диаметром 125, 150 и 175 мм. Изменяли глубину заложения арматурных сеток при разной длине. Шероховатость подошвы обеспечивалась наклейкой песка на штамп. В качестве основания использовался мелкий однородный песок.

В первой серии опытов использовали сетку из стержней диаметром 3 мм с размерами ячеек 20×20 мм. Ширину сетки принимали постоянной и равной диаметру штампа, а длину изменяли от D до $3,5D$.

Результаты опытов сравнивали по величине относительной несущей способности \bar{F}_{us} , равной отношению величин разрушающих нагрузок для армированного и неармированного основания, т.е. $\bar{F}_{us} = F_{us} / F_u$.

До глубины $0,2D$ происходит нарастание несущей способности, а при дальнейшем заглублении – её падение. При расстоянии до армирующего элемента, равным и более D , влияние армирования на несущую способность практически не сказывается.

Эксперименты показали, что за счёт армирования величина разрушающей нагрузки возрастала до трёх раз. Оптимальная глубина расположения арматуры $0,2D$ (рис. 3.1).

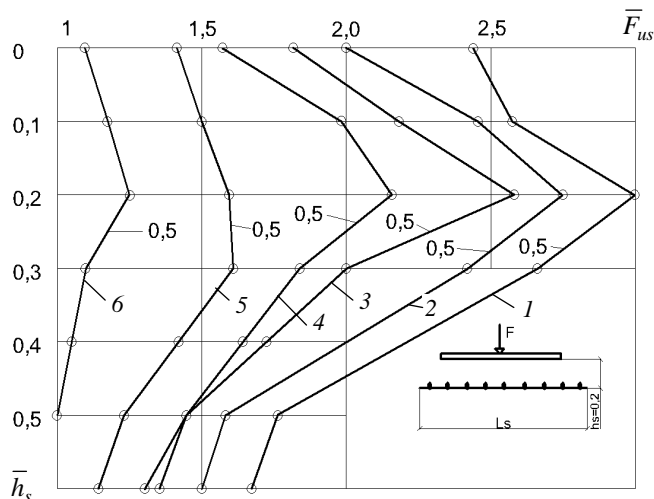


Рис. 3.1. Зависимость разрушающей нагрузки от расстояния до армирующего элемента при различной длине арматуры

Для оценки изменения модуля деформации в зависимости от расстояния до арматуры проводилась серия опытов со штампом $D = 175$ мм при постоянных размерах $l_s = 295$ мм; $b_s = 145$ мм; $s_x = s_y = 15$ мм; $d_s = 4$ мм.

Модуль деформации определяли по формуле

$$E_s = (1 - \nu^2)kD\Delta p / \Delta s.$$

Максимальное значение модуля деформации общих деформаций было отмечено при относительном заглублении $\bar{h}_s = 0,1$; это значение в 4,1 раза превышало модуль деформации неармированного основания (рис. 3.2).

В следующей серии опытов основание армировали сварной металлической сеткой при $\bar{B}_s = 1$; $\bar{d}_s = 0,023$; $\bar{s}_x = \bar{s}_y = 0,16$.

Влияние размеров армирующих элементов на осадку показано на рис. 3.3, а на несущую способность – на рис. 3.4. С увеличением длины сетки происходило существенное возрастание несущей способности основания. Наиболее эффективно армирование сеткой длиной до $3D$.

Подобные результаты получены при армировании плёнкой и сварной металлической сеткой (рис. 3.5).

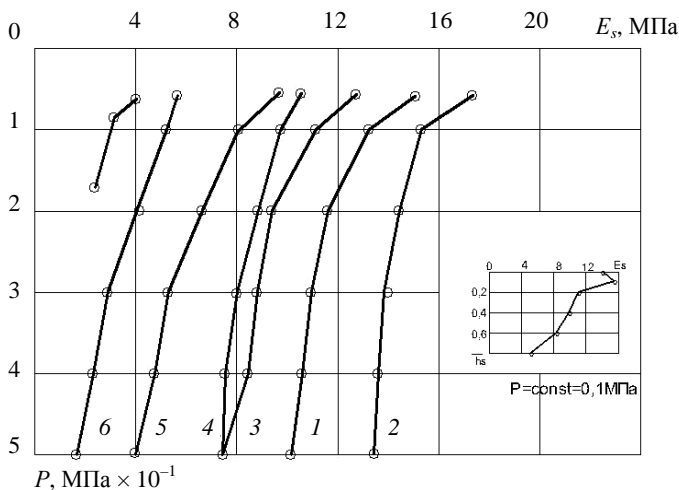


Рис. 3.2. Влияние заглубления арматуры на модуль деформации армированного основания:

1 – $\bar{h}_s = 0$; 2 – $\bar{h}_s = 0,1$; 3 – $\bar{h}_s = 0,2$; 4 – $\bar{h}_s = 0,4$; 5 – $\bar{h}_s = 0,6$; 6 – $\bar{h}_s = 0,8$;

7 – без армирования

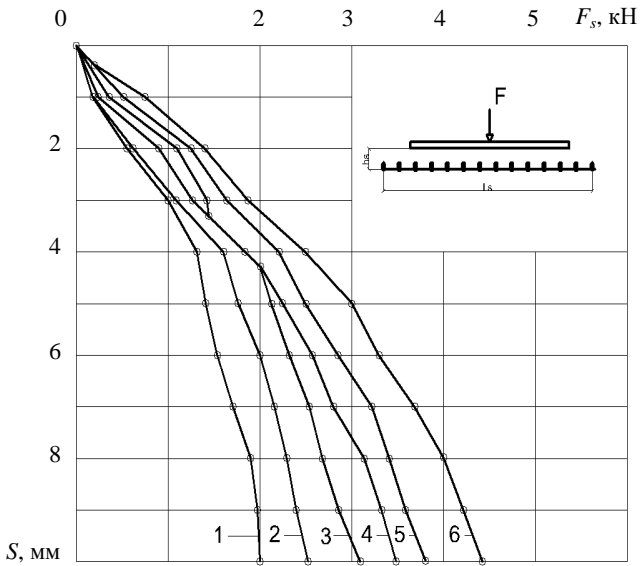


Рис. 3.3. Зависимость осадки от нагрузки при $\bar{h} = h/d_{st} = 0,2$ и $\bar{l}_s = l_s/D =$:
 1 – 0; 2 – 1; 3 – 1,5; 4 – 2; 5 – 2,5; 6 – 3,5

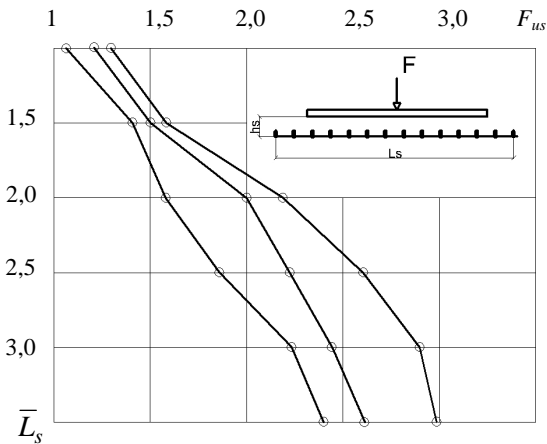


Рис. 3.4. Зависимость относительной несущей способности основания от относительной длины сетки при $\bar{h} = h/d_{st}$:
 1 – 0; 2 – 0,1; 3 – 0,2

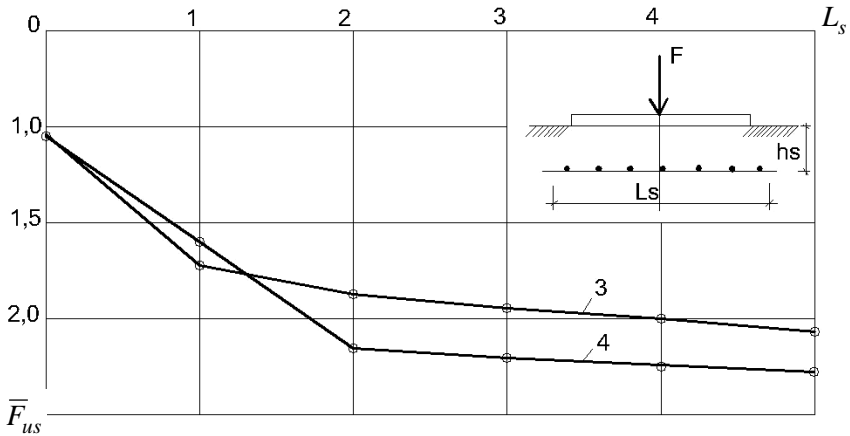


Рис. 3.5. Влияние размеров армирующих элементов – плёнки
(толщиной 0,8 мм (1) и сетки $s_x = s_y = 40$ мм, $d_s = 4$ мм (2))

Исследования со штампом $D = 150$ мм проводились в металлическом лотке размерами $1,8 \times 1 \times 0,85$ (h) м, оснащённом рычажной системой. Грунт-песок мелкий маловлажный ($\omega = 10\%$) послойно уплотняли до $\rho = 1,86$ г/см³.

Для армирования применяли геотекстиль «Дорнит», геометрический центр полотна совмещали с осью нагрузки. Вертикальную нагрузку прикладывали центрально.

Целью проведения экспериментов являлось определение оптимальных параметров: глубины заложения, относительной длины и ширины геотекстильного полотна, угла наклона бортов ϕ . В ходе опытов замеряли разрушающие нагрузки для армированного и неармированного основания. Влияние армирования оценивали коэффициентом увеличения несущей способности основания $k_s = F_{us} / F_u$. Схема армирования приведена на рис. 3.6, а результаты экспериментов на рис. 3.7 – 3.10.

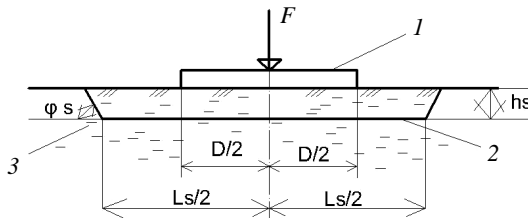


Рис. 3.6. Схема армирования с двумя бортами геотекстильного полотна

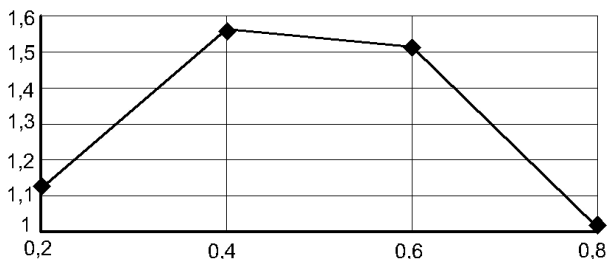


Рис. 3.7. Зависимость коэффициента k_s от относительной глубины заложения геотекстильного полотна (без бортов) при $L_s = 3D$ и $B_s = 2D$

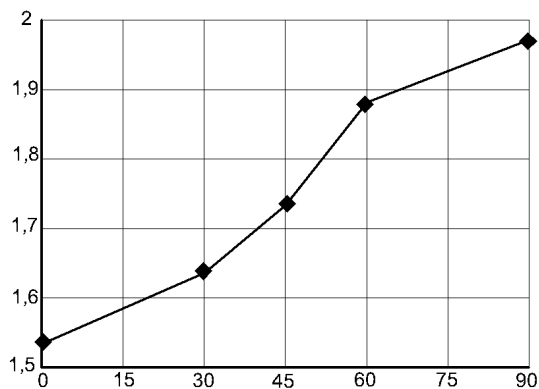


Рис. 3.8. Зависимость коэффициента k_s от угла наклона бортов полотна ϕ при $L_s = 1,5D$ и $B_s = 2D$ и $h_s = 0,4D$

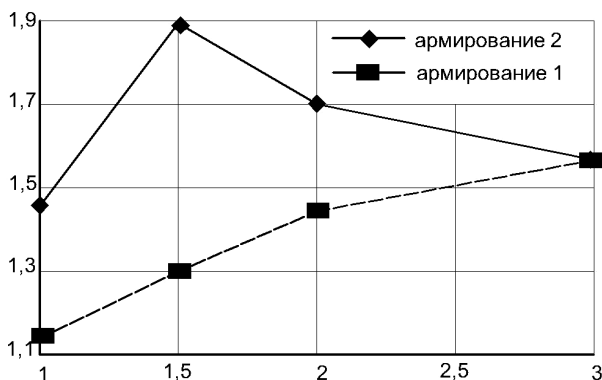


Рис. 3.9. Зависимость коэффициента k_s от относительной длины геотекстильного полотна при $B_s = 2D$ при армировании:
1 – плоским полотном; 2 – полотном с бортами

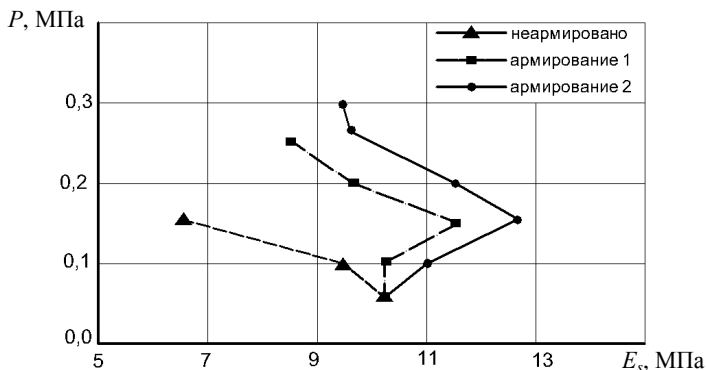


Рис. 3.10. Влияние армирования на модуль деформации основания для схемы:
 1 – при $L_s = 3D$ и $B_s = 2D$; 2 – при $L_s = 1,5D$; $B_s = 2D$ и $\varphi = 60^\circ$

Армирование основания геотекстильным полотном позволяет повысить несущую способность основания в 1,6 раза при плоском армировании и в 1,9 раза при армировании полотном с бортами и увеличить значения модуля деформации в 1,77 раза и в 1,92 раза, соответственно.

Оптимальные параметры армирования для схемы 1: $L_s = 3D$ и $B_s = 2 \dots 2,5D$ и $h_s = 0,4D$; для схемы 2: $L_s = 1,5D$ и $B_s = 2D$ и $h_s = 0,4D$. При практически одинаковом расходе материалов наиболее эффективно применение схемы армирования 2.

Включение геотекстиля в совместную работу с грунтом происходит при нагрузках, составляющих 0,2...0,3 от разрушающих; этим объясняются переломы графиков $P-E$.

В следующей серии опытов использовали георешётку из полосок геотекстиля. Георешётка ограничивает сдвиговые деформации и укрепляет грунты, создавая единую структурную массу, выдерживающую большое давление. Георешётка представляет собой гибкий компактный модуль, состоящий из скреплённых между собой лент геотекстиля, шириной 17 мм и толщиной 0,5 мм, закреплённых в арматурном каркасе (диаметр стержней каркаса 5 мм). Геометрический центр армирующего элемента совмещали с осью нагрузки, глубину заложения принимали $h_s = 0,1D$; $0,2D$; $0,3D$. Определялась осадка во всем диапазоне нагрузок для армированного (на разных глубинах) и неармированного основания образующих в растянутом положении пространственную ячеистую конструкцию.

Грунт – песок мелкий однородный, увлажнённый до оптимальной влажности $\omega = 9 \dots 10\%$, послойно уплотняли трамбовкой до $\rho = 1,74 \dots 1,76 \text{ г/см}^3$. Для армирования применяли сетку с ячейкой 40×40 мм и размерами в плане 300×170 мм. Она состояла из геотекстильных полосок. Ступень

нагрузки принималась 0,1 от предполагаемой разрушающей нагрузки. Каждая ступень нагружения выдерживалась до условной стабилизации осадок (0,01 мм / 0,5 ч.) По результатам экспериментов были построены зависимости нагрузка–осадка, которые представлены на рис. 3.11. На этом же рисунке показана схема армирующего элемента.

Исследование деформативности и несущей способности основания армированного резиновой сеткой (сетка (образец № 1) имела толщину 1,2 см, ячейку 4 × 4 см, диаметр отверстий 2 см) с размерами $L_s = D; 2D; 4D$ проводились при $h_s = 0,2D; 0,4D; 0,6D$. По результатам испытаний оценивали начальное критическое давление, которое определялось по прямолинейному участку графиков нагрузка–осадка, вычислялся модуль деформации и эти значения сравнивались с теми же характеристиками для неармированного песчаного основания. Опыты проводили на моделях диаметрами 100, 125, 150 мм. Результаты экспериментов представлены на рис. 3.12 – 3.15 и в табл. 3.1.

По результатам опытов несущая способность армированного основания на 40...80% выше; эффективность армирования с увеличением глубины заложения и уменьшением размеров терется.

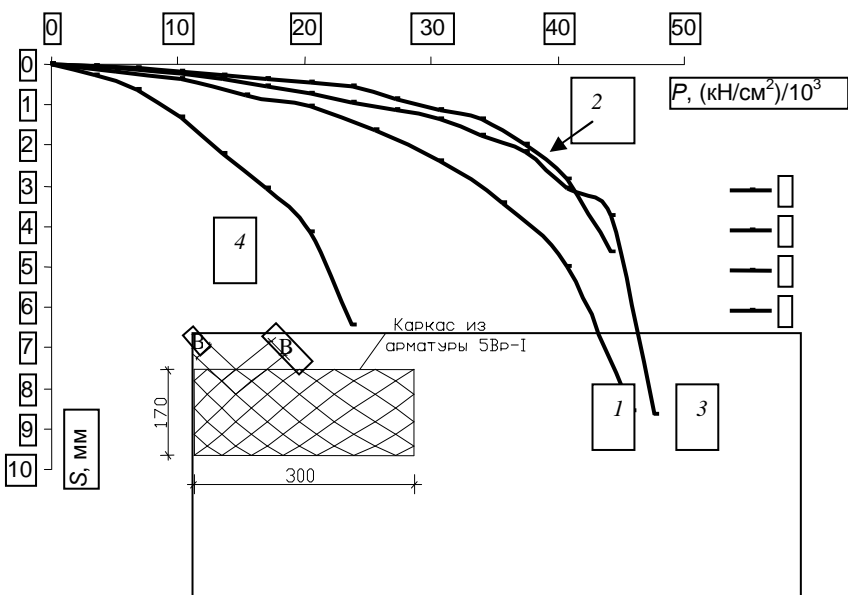


Рис. 3.11. Зависимость давление–осадка штампа при различном расстоянии до армирующего элемента:

1 – 15 мм; 2 – 30 мм; 3 – 45 мм; 4 – неармированное основание

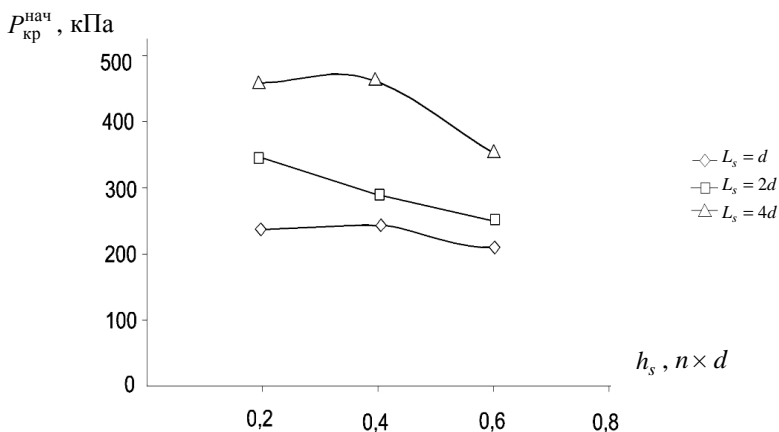


Рис. 3.12. Зависимость $P_{кр}^{нач}$ от глубины заложения сетки для модели $D = 150$ мм

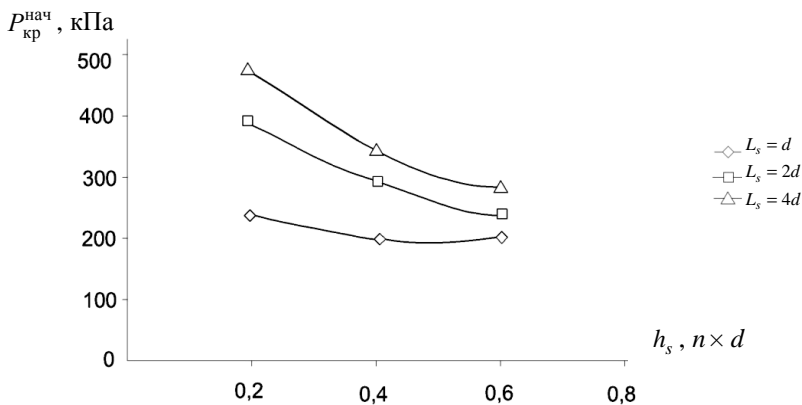


Рис. 3.13. Зависимость $P_{кр}^{нач}$ от глубины заложения сетки для модели $D = 125$ мм

Опыты по оценке несущей способности глинистого основания (су-песь), армированного резиновой сеткой с размерами $L_s = D; 2D; 4D$, проводились на моделях диаметром 100 и 125 мм с глубиной заложения модели 80 мм. Изменялось расстояние до резиновой сетки $h_s = 0,2D; 0,4D; 0,6D$. При двойном армировании расстояние между сетками составляло $h_s = 0,2D$. Резиновая сетка (образец № 1 имела толщину 1,2 см, ячейку 4×4 см, диаметр отверстий 2 см).

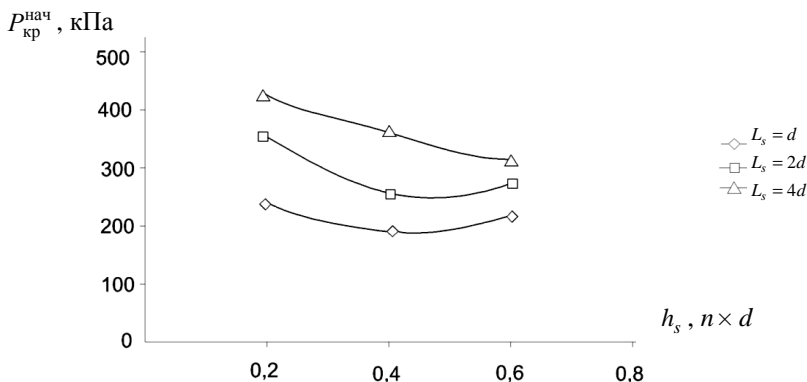


Рис. 3.14. Зависимость $P_{кр}^{нач}$ от глубины заложения сетки для модели $D = 100$ мм

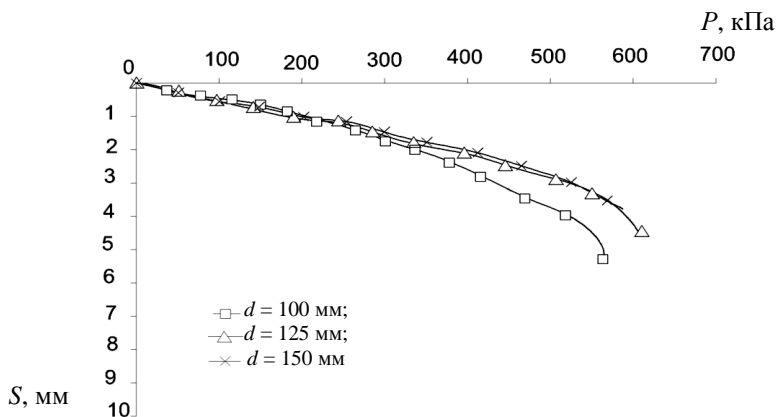


Рис. 3.15. Нагрузка–осадка для моделей различных диаметров при глубине расположения сетки $h_s = 0,2D$, длине $L_s = 4D$

3.1. Эффективность армирования (модуль деформации)

	$d = 100$			$d = 125$			$d = 150$		
	E_0 , кПа	E_s , кПа	\bar{E}_s	E_0 , кПа	E_s , кПа	\bar{E}_s	E_0 , кПа	E_s , кПа	\bar{E}_s
$L_s = d$	9,32	11,20	1,20	14,20	15,34	1,08	9,69	13,64	1,41
$L_s = 2d$	9,32	11,13	1,20	14,20	16,48	1,16	9,69	18,20	1,88
$L_s = 4d$	9,32	12,50	1,34	14,20	18,20	1,28	9,69	23,40	2,41

Результаты опытов представлены на рис. 3.16 – 3.17 и в табл. 3.2.

Армирование супеси повышало несущую способность при одно-
слойном армировании на 15...30% в зависимости от длины, а при двой-
ном – 50...100%; значения модуля деформации несколько снижались за
счёт деформативности самого армоэлемента.

Эффективность армирования с глубиной падала, оптимальной явля-
лась глубина $h_s = 0,2D$.

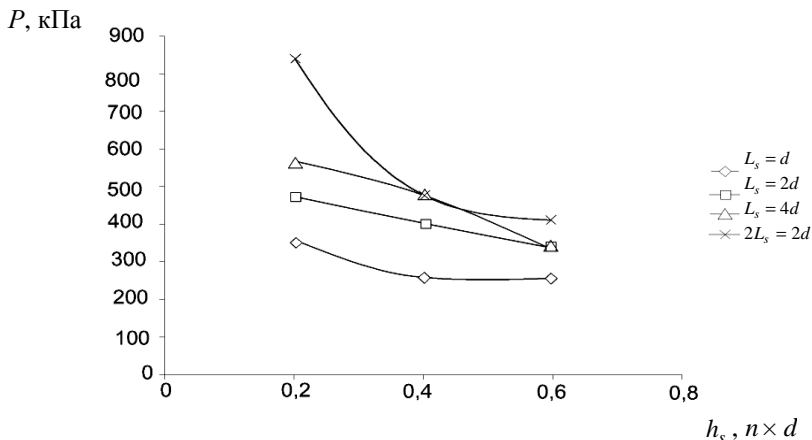


Рис. 3.16. Зависимость $P_{кр}^{нач}$ от глубины заложения сетки и количества слоёв для модели $D = 100$ мм

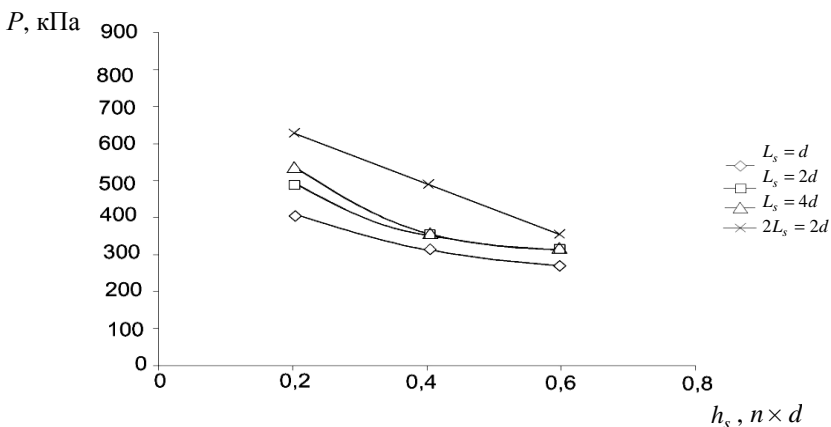


Рис. 3.17. Зависимость $P_{кр}^{нач}$ от глубины заложения сетки и количества слоёв для модели $D = 125$ мм

3.2. Влияние армирования на модуль деформации при разных диаметрах модели

	$d = 100$			$d = 125$		
	E_0 , кПа	E_s , кПа	\bar{E}_s	E_0 , кПа	E_s , кПа	\bar{E}_s
$L_s = d$	13,93	9,10	0,65	13,15	11,09	0,84
$L_s = 2d$	13,93	10,05	0,72	13,15	9,66	0,73
$L_s = 4d$	13,93	10,95	0,79	13,15	10,56	0,80
$2L_s = 2d$	13,93	6,39	0,46	13,15	8,14	0,62

В третьей серии экспериментов с перфорированными резиновыми сетками исследовали несущую способность двухслойного основания (верхний слой – супесь толщиной 5 или 10 см, подстилающий – мелкий песок). Основание армировали сетками с размерами $L_s = 2D$; $4D$ использовали модели диаметром 100, 125 и 150 мм, с глубиной заложения модели 80 мм. Изменялось расстояние до резиновой сетки $h_s = 0,2D$; $0,4D$; $0,6D$. Несущая способность неармированного основания составила 321 кПа.

Результаты опытов представлены в табл. 3.3 и 3.4.

По результатам экспериментов можно сделать вывод, что несущая способность основания повышается армированием на 30% при толщине супеси 5 см и на 50% при толщине 10 см. Увеличение размеров сетки приводит к увеличению разрушающей нагрузки на 20...30%.

3.3. Зависимость несущей способности от глубины заложения и размеров сетки при мощности верхнего слоя супеси 5 см

	F_{us} , кПа, образец № 1			F_{us} , кПа, образец № 2			F_{us} , кПа, образец № 2, в каркасе		
	$h_s = 0,2d$	$h_s = 0,4d$	$h_s = 0,6d$	$h_s = 0,2d$	$h_s = 0,4d$	$h_s = 0,6d$	$h_s = 0,2d$	$h_s = 0,4d$	$h_s = 0,6d$
$L_s = 2d$	343,9	343,9	343,9	343,9	343,9	275,2	412,7	412,7	343,9
$L_s = 4d$	412,7	343,9	275,2	412,7	412,7	343,9	481,6	412,7	343,9

Примечание: образец № 1 – 40×40 и 20×20 см, образец № 2 – 40×40 и 20×20 см; образец № 2 в каркасе из металлических стержней 40×40 и 20×20 см.

Резиновая сетка (образец № 1) имела толщину 1,5 см; ячейку 4×4 см; диаметр отверстий 2 см. Образец № 2 имел толщину 1,2 см; ячейку 4×4 см; диаметр отверстий 2,5 см.

3.4. Зависимость несущей способности от глубины заложения и размеров сетки при мощности верхнего слоя супеси 10 см

	F_{us} , кПа, образец № 1			F_{us} , кПа, образец № 2			F_{us} , кПа, образец № 2, закреплён		
	$h_s = 0,2d$	$h_s = 0,4d$	$h_s = 0,6d$	$h_s = 0,2d$	$h_s = 0,4d$	$h_s = 0,6d$	$h_s = 0,2d$	$h_s = 0,4d$	$h_s = 0,6d$
$L_s = 2d$	481,6	412,7	343,9	481,6	481,6	412,7	481,6	412,7	343,9
$L_s = 4d$	550,4	343,9	275,2	550,4	412,7	343,9	550,4	412,7	343,9

Испытания на глинистом основании ($I_p = 0,18$; $I_l = -0,27$ при постоянной влажности и плотности $\rho = 1,53 \text{ г/см}^3$; $\omega = 0,18$) проводили с изменением относительной глубины заложения ($\bar{h}_s = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0$) с арматурными сетками $\bar{s}_x = \bar{s}_y = 0,1; 0,2; 0,3$ при постоянных размерах сетки $\bar{B}_s = 200 \text{ мм}$; $\bar{d}_s = 4; 5 \text{ мм}$; $\bar{L}_s = 400 \text{ мм}$. Нагружение вертикальное центральное.

По результатам экспериментов получены функции зависимости несущей способности и осадки основания от глубины заложения арматурной сетки. Определено, что максимальная величина несущей способности армированного основания достигается при глубине $\bar{h}_s = 0,2$ и эффективность армирования теряется с увеличением глубины заложения сетки.

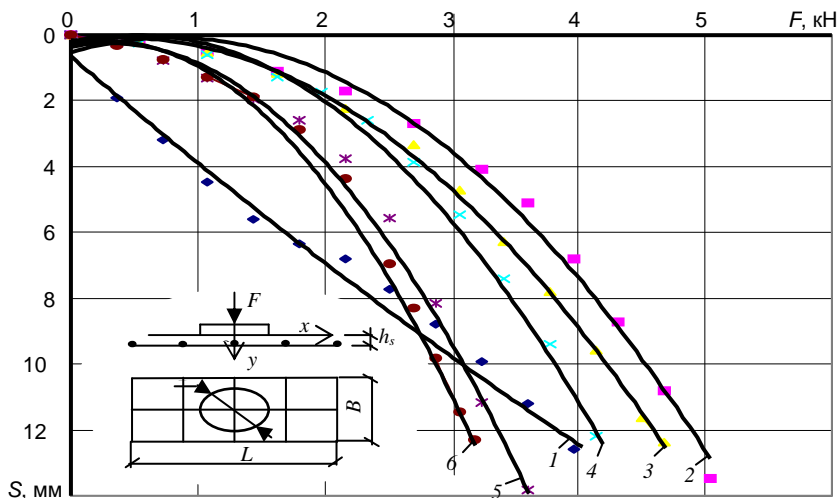


Рис. 3.18. График зависимости осадки от нагрузки, при \bar{h}_s :

1 — 0; 2 — 0,2; 3 — 0,4; 4 — 0,6; 5 — 0,8; 6 — 1

3.2. ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ АРМИРОВАНИЯ

Основание армировали сварной металлической сеткой. Изменяли относительный шаг стержней, относительное расстояние от подошвы штампа $\bar{h}_s = 0; 0,25; 0,5; 0,75$ и 1. Изменяли относительный шаг стержней $\bar{s}_x = \bar{s}_y = 0,1; 0,2; 0,3$ при постоянных размерах сетки $\bar{B}_s = 1$ мм; $\bar{d}_s = 4$ мм; $\bar{L}_s = 2$ мм.

Эксперименты проводили со штампом диаметром 150 мм.

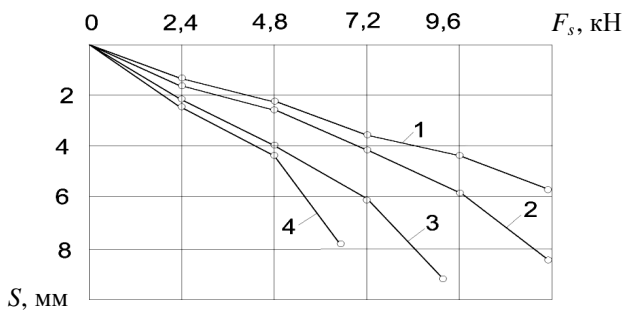
Как видно из результатов опытов (табл. 3.5), уменьшение шага стержней ведёт к увеличению относительной несущей способности, но происходит падение приращения несущей способности, т.е. эффективность армирования снижается.

Для изучения влияния диаметра стержней на несущую способность основания использовали штамп $D = 180$ мм. В качестве армоэлемента применяли сетку с относительными размерами: $b_s \times l_s = 200 \times 300$ мм; шаг стержней $s_x = s_y = 15$ мм; диаметр $d_s = 1, 2, 3$ мм.

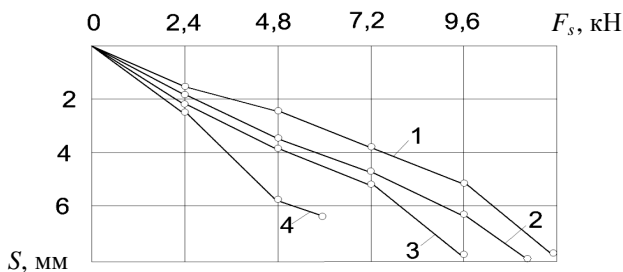
С увеличением диаметра от 1 до 3 мм происходило увеличение несущей способности. Так, для осадки $s = 6$ мм, при $h_s = 0,2D$, разрушающая нагрузка возросла с 10,8 до 12 кН (рис. 3.19).

3.5. Влияние шага стержней и расстояния до сетки на несущую способность основания

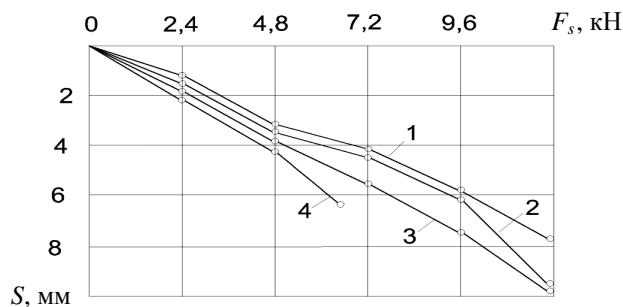
\bar{s}	\bar{h}_s	F_{us} , Н	\bar{F}_{us}
0,1	0	700	1,84
	0,25	1140	3,00
	0,5	1050	2,84
	0,75	560	1,48
	1	380	1,00
0,2	0	620	1,63
	0,25	1040	2,81
	0,5	840	2,06
	0,75	500	1,31
	1	380	1,00
0,3	0	600	1,58
	0,25	990	3,61
	0,5	810	2,13
	0,75	400	1,06
	1	380	1,00



a)



б)



в)

Рис. 3.19. Зависимость осадки штампа от нагрузки при d_s (мм):

a – 3 мм; $б$ – 2 мм; $в$ – 1 мм и расстояния до арматуры h_s :

1 – 0,2D; 2 – 0,4D; 3 – 0,6D; 4 – 0,8D

В следующей серии опытов со штампом диаметром 150 мм сохраняли постоянными размеры сетки и отношение $\bar{s} = s_x / d_s = 15$. Изменяли относительный шаг $\bar{s} = 0,02; 0,03; 0,04$ и диаметр стержней $d_s = 2, 3$ и 4 мм.

Результаты опытов представлены на рис. 3.20.

Ещё серия опытов проводилась со штампом диаметром 125 мм. Исследовали влияние шага армирования на осадку штампа. Для этого применяли сетки с различными ячейками: $s_x = s_y = 15, 20, 30$ и 40 мм, а также сетку с $s_x = 45, s_y = 60$ мм. Постоянными принимали следующие параметры: $\bar{h}_s = 0,2$; $\bar{l}_s = 3,5$; $\bar{b}_s = 1,4$.

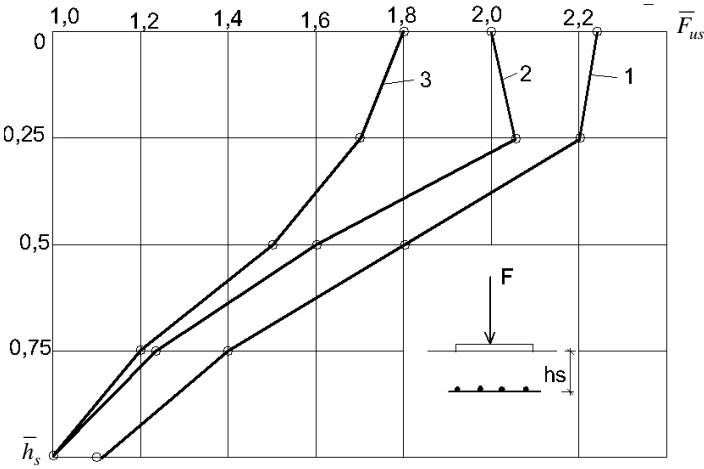


Рис. 3.20. Зависимость относительной разрушающей нагрузки от относительного шага стержней \bar{s} :

1 – 0,03 ($d_s = 3$ мм); 2 – 0,02 ($d_s = 2$ мм); 3 – 0,04 ($d_s = 4$ мм)

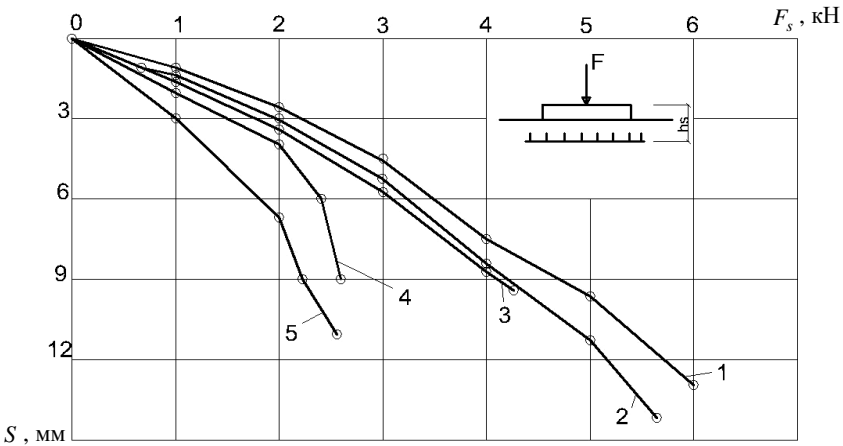


Рис. 3.21. Зависимость осадка–нагрузка при размерах ячейки сетки (мм):

1 – 15 × 15; 2 – 20 × 20; 3 – 30 × 30; 4 – 40 × 40; 5 – 45 × 65

Опыты показали (рис. 3.21), что с уменьшением размера ячейки происходит возрастание несущей способности с уменьшающейся скоростью.

Для оценки изменения модуля деформации в зависимости от шага стержней сетки и диаметра арматуры проводилось две серии опытов со штампом $D = 175$ мм при постоянных размерах: $l_s = 295$ мм; $b_s = 145$ мм; $h_s = 0,2D$. Результаты опытов представлены на рис. 3.22 и 3.23.

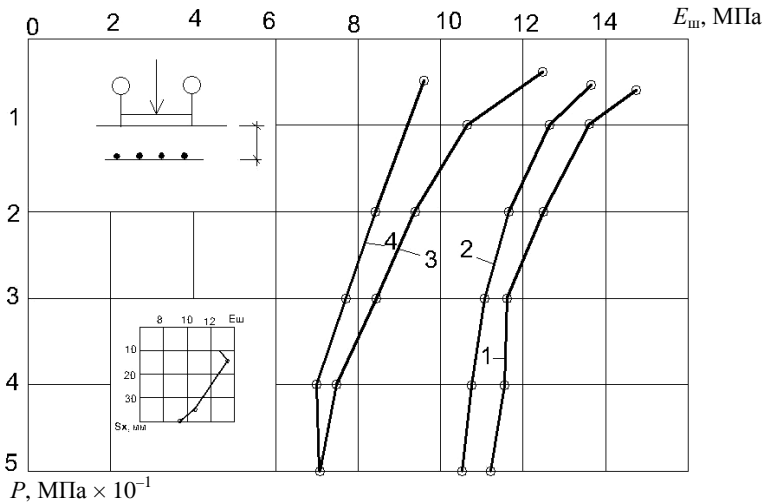


Рис. 3.22. Влияние шага сетки на модуль общей деформации

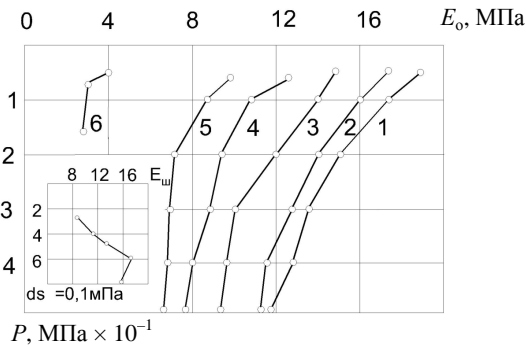


Рис. 3.23. Влияние диаметра арматуры на модуль общей деформации d_s , равном: 1 – 6 мм; 2 – 8 мм; 3 – 5 мм; 4 – 4 мм; 5 – 3 мм, 6 – без армирования

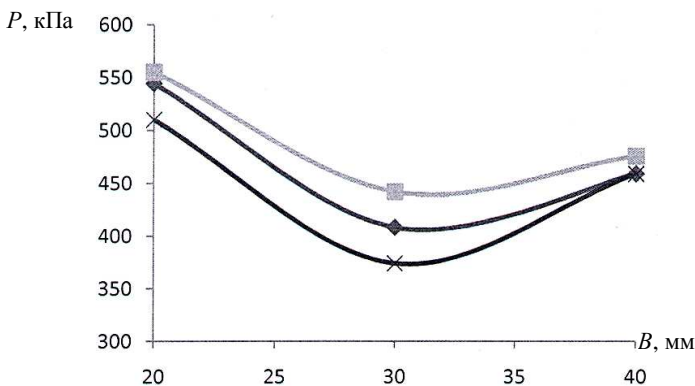


Рис. 3.24. Зависимость предельного давления на армированное основание от шага армирующих элементов при расстоянии до арматуры:
 \times – 45 мм; \blacksquare – 30 мм; \blacklozenge – 15 мм

В следующей серии опытов меняли шаг и заглубление сеток выполненных из полосок геотекстиля в металлическом каркасе размером 30×17 см; ширина полос 1,7 см; размеры ячеек 2×2 ; 3×3 ; 4×4 см. Грунт – песок мелкий однородный, увлажнённый до оптимальной влажности $\omega = 9 \dots 10\%$, послойно уплотняли трамбовкой до $\rho = 1,74 \dots 1,76 \text{ г/см}^3$.

Изменяли расстояние от подошвы штампа $D = 150$ мм до сетки – 15, 30, 45, 60 мм. Результаты экспериментов представлены на рис. 3.24.

Максимальное значение разрушающей нагрузки наблюдалось при минимальном шаге.

При армировании несущая способность песчаного основания увеличилась на 22...81% по сравнению с неармированным основанием. Модуль деформации армированного основания повысился в 1,1–1,96 раза по сравнению с неармированным. Относительная осадка понизилась 1,82 – 3,18 раза при одинаковом давлении на основание $P = 300$ кПа.

В серии опытов на глинистом основании при $\omega = 0,18$ и $\rho = 1,53 \text{ г/см}^3$ использовали сетки с шагом $s_x = s_y = 100$ мм; $s_x = s_y = 66,67$ мм; $s_x = 40$ мм, $s_y = 50$ мм при постоянной глубине заложения сетки $h_s = 0,2D = 24$ мм.

По результатам экспериментов получены аппроксимированные функции зависимости несущей способности и удельной несущей способности армированного основания от диаметра стержней сетки. Установлено, что предельная несущая способность основания возрастает с увеличением диаметра арматуры от $d_s = 4$ мм до $d_s = 9$ мм в 1,3 – 1,46 раз при разных шагах сетки (в 1,3 раза при $s_x = s_y = 100$ мм; 1,34 раза при $s_x = 40$ мм, $s_y = 50$ мм и в 1,46 раза при $s_x = s_y = 66,67$ мм). Удельная несущая способность основания возрастает с уменьшением диаметра арматуры от $d_s = 9$ мм до $d_s = 4$ мм (в 3,46 – 3,91 раза) при разных шагах стержней.

3.6. Эффективность влияния объёма арматурной сетки

Марка сетки	F_u , кН	F_{su} , кН	\bar{F}_{su}	V_s , см ³	\bar{F} , кН/см ³
C1	2,88	4,32	1,5	27,632	0,156
C2	2,88	3,96	1,375	24,366	0,162
C3	2,88	5,04	1,75	95,205	0,053
C4	2,88	5,04	1,75	43,175	0,117
C14	2,88	6,12	2,125	114,610	0,053
C15	2,88	4,50	1,562	61,819	0,073

Примечание: C1 размерами $b_s \times l_s = 200 \times 400$ мм, шаг стержней $s_x = s_y = 100$ мм, диаметр $d_s = 4$ мм. C2 размерами $b_s \times l_s = 120 \times 140$ мм, шаг стержней $s_x = s_y = 20$ мм, диаметр $d_s = 4$ мм. C3 размерами $b_s \times l_s = 220 \times 320$ мм, шаг стержней $s_x = s_y = 20$ мм, диаметр $d_s = 4$ мм. C4 размерами $b_s \times l_s = 200 \times 400$ мм, шаг стержней $s_x = s_y = 100$ мм, диаметр $d_s = 9$ мм. C5 размерами $b_s \times l_s = 160 \times 260$ мм, шаг стержней $s_x = s_y = 15$ мм, диаметр $d_s = 5$ мм. C6 размерами $b_s \times l_s = 150 \times 300$ мм, шаг стержней $s_x = 30$, $s_y = 40$ мм, диаметр $d_s = 5$ мм.

На этом же основании при постоянных величинах влажности, плотности, глубине заложения сетки и диаметра проводились опыты с изменением объёма и шага стержней сетки. Влияние объёма арматурной сетки на несущую способность представлена в табл. 3.6.

3.3. ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНОГО АРМИРОВАНИЯ

Эксперименты проводились со штампом $D = 100$ мм. В качестве арматуры использовали сетки с размерами $\bar{l}_s = 2$; $\bar{b}_s = 1$; $s_x = s_y = 45$ мм; $d_s = 4$ мм. Сетки располагали в два яруса (см. рис. 3.25). Последовательно изменяли расстояние до верхней сетки при фиксированном расстоянии до нижней сетки. Полученные результаты приведены в табл. 3.7.

Анализ экспериментов показывает, что расстояние между армирующими элементами и количество слоев армирования оказывают значительное влияние на несущую способность основания.

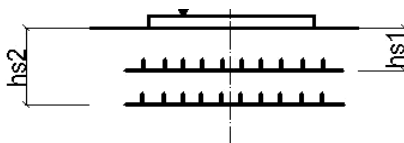


Рис. 3.25. Схема армирования

3.7. Влияние двойного армирования на несущую способность центрально загруженного штампа

\bar{h}_{s2}	\bar{h}_{s1}	\bar{F}_{us}
1	2	3
1	0,8	1,23
1	0,6	1,65
1	0,4	2,00
1	0,2	2,30
1	0,1	2,40
1	0,0	2,10
0,8	0,6	2,00
0,8	0,4	2,20
0,8	0,2	3,00
0,8	0,1	2,90
0,8	0,0	2,40
0,6	0,3	2,30
0,6	0,2	3,20
0,6	0,1	2,90
0,6	0,0	2,40
0,4	0,2	4,10
0,4	0,1	4,10
0,4	0,0	3,80
0,4	0,1	4,30
0,2	0,0	4,20

Максимальный эффект наблюдался при расположении первого и второго слоя арматуры на глубинах $\bar{h}_{s1} = 0,2$ и $\bar{h}_{s2} = 0,4$ от подошвы штампа. Учитывая, что при однослойном армировании наблюдали $\bar{h}_{sopt} = 0,2$, этот (верхний) слой при двухъярусном армировании может рассматриваться как подошва фиктивного фундамента. Тогда второй слой, расположенный на глубине $0,2D$ под первым, будет находиться в зоне максимальных растягивающих напряжений.

3.4. ОПЫТЫ НА ВЫДЕРГИВАНИЕ АРМИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

В этом цикле экспериментов рассматривалось влияние различных параметров: глубины заложения металлической сетки, плотности основания, диаметра и шага арматуры на выдергивающую нагрузку.

Испытания проводили в лотке с размерами $1000 \times 1000 \times 700$ мм, выполненном из листовой стали толщиной 5 мм. Значение выдергивающей нагрузки определяли на разрывной машине типа ИР 5057-50 с силоизмерительным центром.

В первой серии опытов этого цикла определяли зависимость выдергивающей нагрузки от диаметра арматуры, в качестве которой использовалась сетка с размерами $l_s = 295$ мм; $b_s = 200$ мм; $s_x = s_y = 20$ мм; $d_s = 2, 4, 6, 8$ мм. С увеличением диаметра наблюдалось повышение выдергивающей нагрузки с 19,2 до 25 кН (рис. 3.30).

В следующей серии опытов изменяли шаг стержней при постоянном диаметре $d_s = 5$ мм. С уменьшением шага с 40 до 10 мм произошло увеличение выдергивающей нагрузки с 12,2 до 16,8 кН. Явление интерференции в этой серии опытов не наблюдалось (рис. 3.31).

В третьей серии экспериментов изменяли заглубление сетки ($s_x = s_y = 20$ мм; $d_s = 5$ мм) с $0,2D$ до D . По мере заглубления наблюдался рост выдергивающей нагрузки (рис. 3.32).

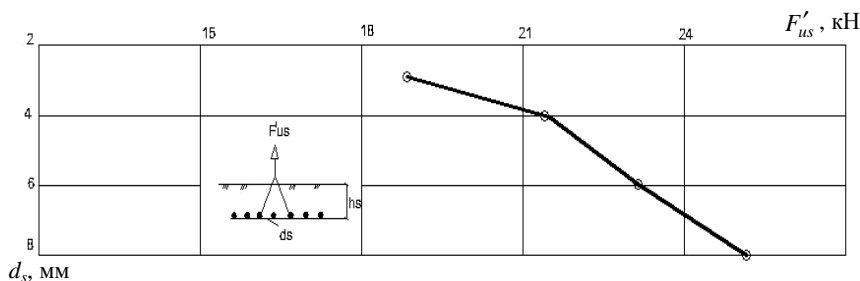


Рис. 3.30. Влияние диаметра стержней сетки на выдергивающую нагрузку

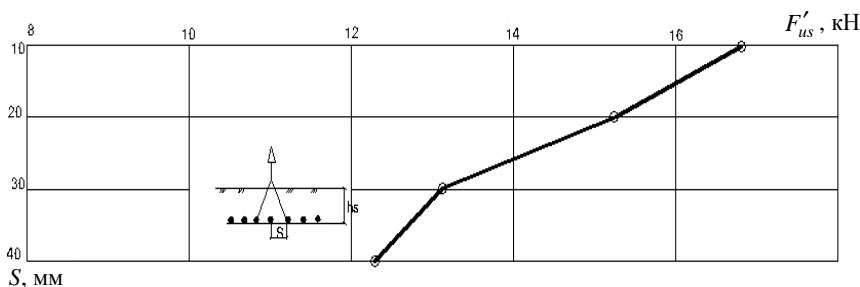


Рис. 3.31. Влияние шага стержней на выдергивающую нагрузку

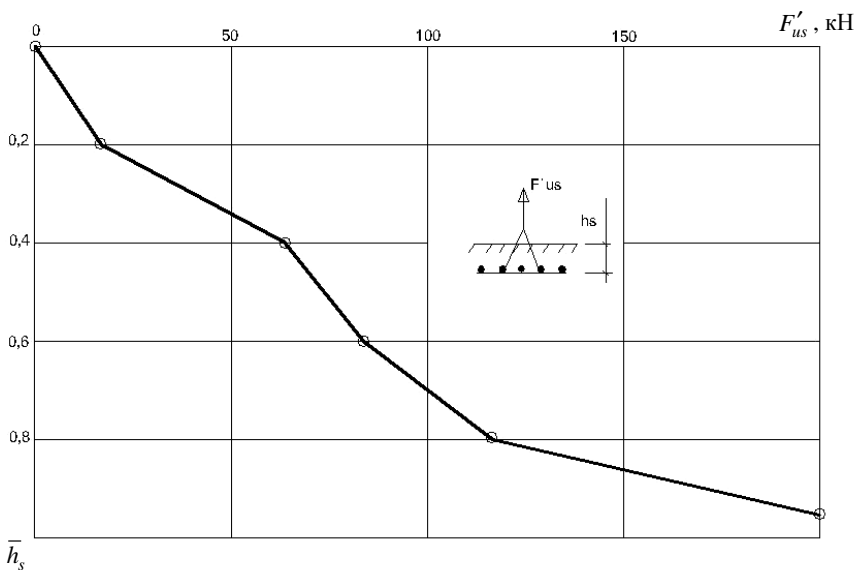


Рис. 3.32. Влияние заглубления арматуры на выдергивающую нагрузку

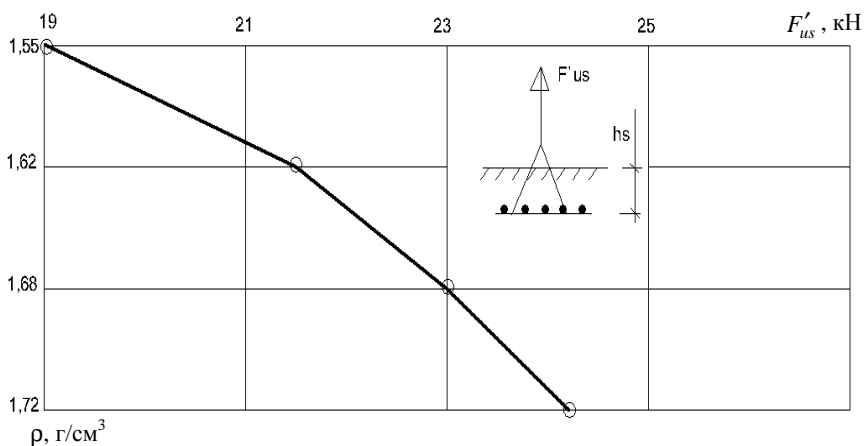


Рис. 3.33. Влияние плотности грунта на выдергивающую нагрузку

В последней серии опытов этого цикла изменяли плотность песка с 1,55 до 1,72 г/см³, плотность контролировали с помощью режущего кольца и пенетromетра. Заглубление сетки оставалось постоянным, $\bar{h}_s = 0,2$. Увеличение плотности на 0,17 г/см³ дало повышение выдергивающей силы с 19 до 24,2 кН (рис. 3.33).

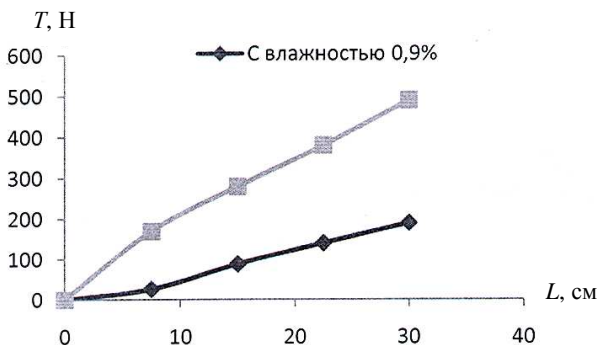


Рис. 3.34. Зависимость выдергивающей нагрузки от глубины расположения сетки при различной плотности песка при влажности 0,9 и 9,9%

Испытания следующей серии проводились с сетками из геотекстильных полос в металлическом каркасе размером 30×17 см, ширина полос 1,7 см, размер ячейки 2×2 см. Эксперименты велись при разной плотности и влажности: при влажности 0,9% – в воздушно-сухом состоянии (плотность составила $\rho = 1,45 \text{ г/см}^3$) и при оптимальной влажности 9,9% ($\rho = 1,7 \text{ г/см}^3$). В результате испытаний получали выдергивающую силу T (Н) в зависимости от величины заглубления образца L (см). Грунт вокруг образцов уплотняли трамбовкой до заданной плотности. Результаты экспериментов приведены на рис. 3.34.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Армирование оснований фундаментов позволяет повысить прочностные и деформационные свойства грунта, передать растягивающие напряжения на арматуру за счёт сил трения по контактной поверхности.

Создание под подошвой фундамента более жёсткой области, чем окружающий массив, при площади армирования, большей или равной площади фундамента, приводит к увеличению прочности основания, трансформации контактных напряжений, уменьшению краевых ординат и повышению средних.

Значения несущей способности основания могут быть увеличены за счёт создания более жёсткого массива в 2-3 раза (в зависимости от схемы армирования и вида армирующих элементов), соответственно, снижаются значения деформаций.

В данной монографии рассмотрены случаи только вертикального осевого приложения силы. Внецентренное загрузеение, приложение циклических нагрузок, длительное нагружение, т.е. случаи передачи сложных силовых факторов планируется рассмотреть в дальнейших публикациях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 12248-96. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.
2. ГОСТ 5180-84. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик.
3. ГОСТ 30416-96. Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения.
4. ГОСТ 12536-79. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава.
5. ГОСТ 20522-96. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний.
6. Антонов, В.М. Влияние армирования на несущую способность и деформативность песчаного основания : автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.М. Антонов. – Волгоград : ВолгГАСА, 1998. – 20 с.
7. Антонов, В.М. Экспериментальное исследование армированных песчаных оснований / В.М. Антонов // Современные проблемы фундаментостроения : сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Волгоград, 2001. – С. 9–10.
8. Антонов, В.М. Влияние армирования на прочностные и деформационные характеристики песчаного основания / В.М. Антонов, В.В. Леденев, Д.А. Прокин // Надёжность и долговечность строительных материалов конструкций и оснований фундаментов : сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Волгоград : ВолгГАСА, 2005. – С. 9 – 13.
9. Antonov, V.M. Calculation of Reinforced foundation (Расчет армированных оснований) / V.M. Antonov, V.V. Ledenev // Proceeding of the Tambov State Engineering university (Вестник ТГТУ). 1997. – Vol. 3, N 4. – P. 482 – 488. 6/4.
10. Барвашов, В.А. Сооружения из армированного грунта / В.А. Барвашов, В.А. Воронель // Обзор ВНИИС. – М., 1984. – Вып. 7. – С. 25 – 30.
11. Джоунс, К.Д. Сооружения из армированного грунта / К.Д. Джоунс ; пер. с англ. В.С. Забавина ; под ред. д-ра техн. наук В.Г. Меньшикова. – М. : Стройиздат, 1989. – 280 с.
12. Рекомендации по комплексному изучению и оценке строительных свойств песчаных грунтов // ПНИИС Госстроя СССР, МИСИ. – М. : Стройиздат, 1984. 25 с.
13. Рубан, О.А. Определение прочностных характеристик армогрунтов по результатам лабораторных исследований / О.А. Рубан, Ю.Б. Балашова // Современные проблемы фундаментостроения : сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Волгоград, 2001. – С. 58 – 61.
14. СНиП 2.02.01-83*. Основания зданий и сооружений // Госстрой СССР. – М. : ЦНТП Госстроя СССР, 1995. – 20 с.
15. Тимофеева, Л.М. Армирование грунтов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Л.М. Тимофеева. – М. : МИСИ, 1992. – 30 с.
16. Хрянина, О.В. Изменения напряжённого состояния грунтов основания введением в него армирующих элементов / О.В. Хрянина, Г.Г. Болдырев // Современные проблемы фундаментостроения : сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Волгоград, 2001. – С. 96 – 98.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСНОВАНИЯ	4
1.1. Несвязное основание	4
1.2. Связное основание	9
1.3. Двухслойное основание	16
1.4. Ослабление основания линзами	16
2. ДИСКРЕТНОЕ АРМИРОВАНИЕ	19
2.1. Вертикальное стержневое армирование	19
2.2. Горизонтальное стержневое армирование	31
2.3. Армирование стержнями малых размеров	37
2.4. Полосовое армирование	43
2.5. Инъекционное закрепление	47
2.6. Дисперсное армирование	53
3. АРМИРОВАНИЕ ПЛОСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ	55
3.1. Влияние расстояния до армирующего элемента и геометрических размеров на несущую способность основания	55
3.2. Влияние интенсивности армирования	67
3.3. Исследование многослойного армирования	72
3.4. Опыты на выдергивание армирующих элементов	74
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	77
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	78

Научное издание

АНТОНОВ Василий Михайлович

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АРМИРОВАННЫХ ОСНОВАНИЙ

Монография

Редактор З.Г. Чернова

Инженер по компьютерному макетированию М.Н. Рыжкова

Подписано в печать 20.05.2011.

Формат 60 × 84 / 16. 4,65 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 271

Издательско-полиграфический центр ГОУ ВПО ТГТУ
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14