

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>

Russian journal of transport engineering

2020, №2, Том 7 / 2020, No 2, Vol 7 <https://t-s.today/issue-2-2020.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/17SATS220.pdf>

DOI: 10.15862/17SATS220 (<http://dx.doi.org/10.15862/17SATS220>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Артюшенко И.А. Зависимость физико-механических характеристик и коэффициента безопасности грунтового массива от шага расстановки вертикальных столбов из щебня // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2020 №2, <https://t-s.today/PDF/17SATS220.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/17SATS220

For citation:

Artyushenko I.A. (2020). Dependence of physico-mechanical characteristics and safety factor of the soil mass on the spacing of vertical pillars of crushed stone. *Russian journal of transport engineering*, [online] 2(7). Available at: <https://t-s.today/PDF/17SATS220.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/17SATS220

УДК 624.138.231.1

ГРНТИ 67.29.63

Артюшенко Игорь Александрович

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия

Аспирант кафедры «Проектирование и строительство железных дорог»

E-mail: tywka351@mail.ru

Зависимость физико-механических характеристик и коэффициента безопасности грунтового массива от шага расстановки вертикальных столбов из щебня

Аннотация. При проектировании, строительстве и дальнейшей эксплуатации путей сообщения на многолетнемерзлых грунтах наиболее актуальной задачей является обеспечение надежности основания сооружения. Сложность строительства в районах Севера обусловлена наличием многолетнемерзлых грунтов в основаниях сооружений, большим количеством естественных природных преград, экстремальными природно-климатическими условиями и отсутствием инфраструктуры.

В связи с этим выбор конструктивно-технологических и организационных решений по развитию транспортной инфраструктуры, включающий для железных и автомобильных дорог, прежде всего, прогноз деформативности, мероприятия по обеспечению устойчивости грунтового основания и разработку рациональных организационных схем по их реализации, должен быть экономически целесообразным, оптимальным или близким к оптимальному для конкретного инженерного сооружения и региона его расположения.

Для обеспечения стабильности и устойчивости грунтового основания сооружения на участке «Северного широтного хода» новой железнодорожной линии Обская-Салехард, ПК 01+50 – ПК 06+50 автором предложено решение произвести усиление грунтов основания вертикальными столбами из щебня.

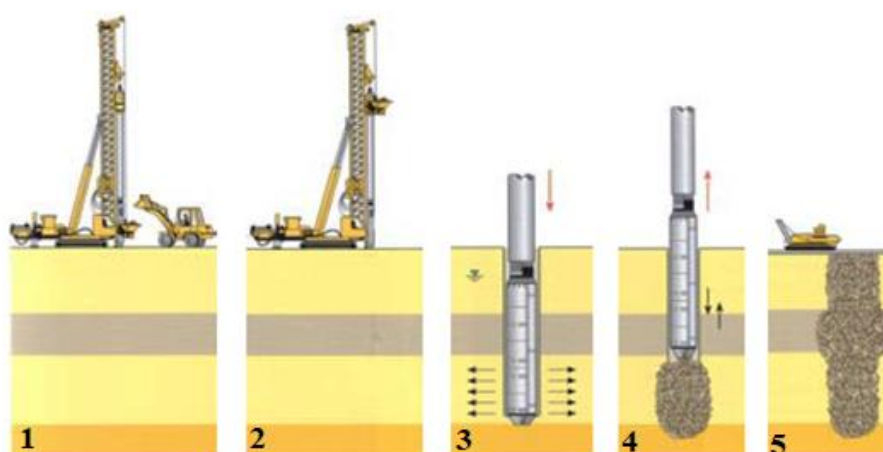
В данной статье показано влияние вертикальных столбов из щебня на прочностные характеристики многолетнемерзлых грунтов основания сооружения. Показана зависимость прочностных характеристик грунтового основания от разных шагов расстановки вертикальных столбов из щебня. Сделан вывод о наиболее оптимальном шаге расстановки по результатам расчетов и сравнения различных шагов расстановки вертикальных столбов из щебня.

Результаты, изложенные в статье, являются частью диссертационного исследования Артюшенко И.А. «Усиление основания земляного полотна вертикальными столбами из щебня на участках с многолетнемерзлыми грунтами».

Ключевые слова: грунтовое основание; железная дорога; автомобильная дорога; транспорт; многолетнемерзлые грунты; вертикальные столбы из щебня; усиление грунтового основания

Введение

Вертикальные столбы из щебня (название согласно СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений», раздел 6.10.30¹) представляют собой массив столбов из щебня, помещенных с помощью вибрирующего инструмента в грунт под предполагаемым объектом. Этот метод улучшения грунтов оснований также известен как виброзамещение грунтов. Процесс усиления грунта основания вертикальными столбами из щебня показан на рисунке 1.



1 – доставка щебня; 2 – наполнение щебнем приёмного резервуара; 3 – погружение виброколонны; 4 – введение щебня и его уплотнение с помощью попеременных движений вверх и вниз; 5 – изготовленный вертикальный столб из щебня

Рисунок 1. Усиление грунтов основания вертикальными столбами из щебня [1]

Вертикальные столбы из щебня могут быть применены как при строительстве железных, автомобильных дорог и мостов, так и при укреплении береговой линии водоемов и намывных территорий.

Данная технология увеличивает несущую способность основания, столбы выступают в роли вертикальных дренажей, тем самым предотвращая переувлажнение грунтов основания. Вертикальные столбы из щебня проектируются по всей области, которая будет усилена, в шахматном порядке, либо в виде треугольной или прямоугольной сетки. Эта технология используется в Европе с 1950-х годов, а в Соединенных Штатах с 1970-х годов [2].

Технология устройства вертикальных столбов из щебня увеличивает прочностные характеристики массива грунта, вследствие чего значительно увеличивается его несущая способность и устойчивость. Устройство столбов позволяет уменьшить значение деформаций основания от 2 до 6 раз [3].

¹ СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83. – М.: институт АО «НИЦ «Строительство», 2017. – 225 с.

В районах распространения многолетнемерзлых грунтов технология устройства вертикальных столбов до настоящего времени не использовалась.

В статье [4] было рассмотрено влияние технологии усиление грунтового основания вертикальными столбами из щебня на устойчивость сооружения. Проведенный расчет показывает, что данная технология оказывает благоприятное влияние на устойчивость сооружения, тем самым подтверждая техническую эффективность данной технологии на участках с многолетнемерзлыми грунтами [4].

В статье [5] рассмотрено влияние технологии усиление грунтового основания вертикальными столбами из щебня на температурные показатели грунтов основания. Был сделан вывод, что без применения армирования вертикальными столбами из щебня за 10 лет граница нулевых амплитуд опускается, вследствие чего происходит увеличение талой зоны и деградация многолетних мерзлых грунтов. В случае с использованием технологии армирования вертикальными столбами из щебня, граница нулевых амплитуд в зоне их действия поднимается – соответственно идёт уменьшение талой зоны [5].

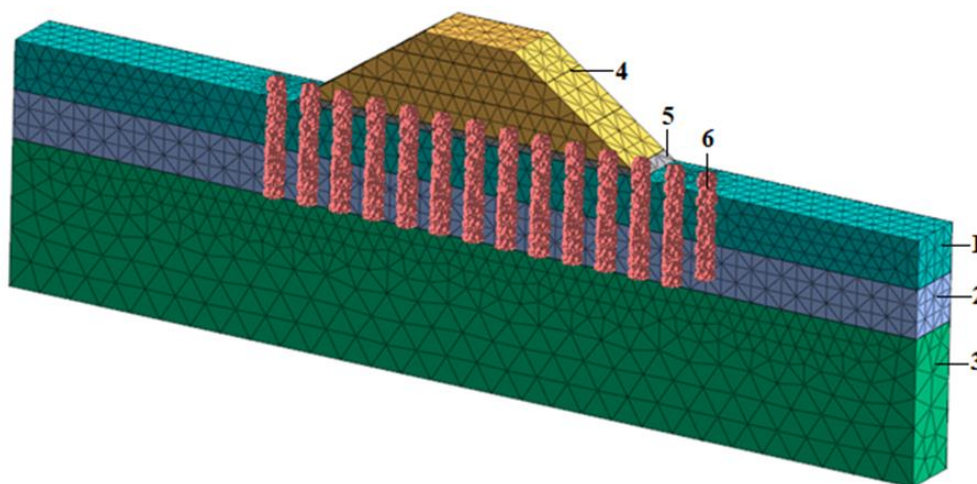
Целью данного исследования является анализ влияния шагов расстановки вертикальных столбов из щебня на прочностные характеристики грунтов основания сооружения, возводимые на многолетнемерзлых грунтах с допущением оттаивания. Для достижения указанной цели использовались общенаучные методы и сравнительный анализ.

1. Описание объекта исследования и его свойств

В качестве объекта исследования взят участок «Северного широтного хода» новой железнодорожной линии Обская-Салехард, ПК 01+50 – ПК 06+50.

Инженерно-геологический разрез до глубины 6 м представлен суглинком мягкопластичным и суглинком текучепластичным, ниже на глубине 7 м вскрывается мерзлая супесь. Мощность сезонно-талого слоя 2,9–3,0 м. В пределах участка предполагается насыпь высотой 6 м. Вертикальные столбы из щебня имеют длину 7,2 м, диаметр 700 мм.

Объект, усиленный вертикальными столбами из щебня, смоделирован в программном комплексе Midas GTS NX и представлен на рисунке 2.



1 – суглинок мягкопластичный (при оттаивании текучий); 2 – суглинок текучепластичный; 3 – супесь мерзлая; 4 – песок средней крупности (материал насыпи); 5 – щебеночная подушка; 6 – вертикальные столбы из гранитного щебня фракции 20–40 мм

Рисунок 2. Общий вид расчетной схемы, смоделированный в программном комплексе Midas GTS NX (разработано автором)

Начальные прочностные характеристики грунтов основания сооружения представлены в таблице 1.

Таблица 1

**Прочностные характеристики грунтов и щебня,
используемого для изготовления вертикальных столбов²**

Характеристики			Наименование					
Параметр	Обозначение	Ед. изм.	Суглинок мягкопластичный (при оттаивании текучий)	Суглинок текучепластичный	Супесь мерзлая	Песок средней крупности (материал насыпи)	Щебень (материал для грунтовых столбов)	Щебень (материал для щебеночной подушки)
Удельный вес грунта сухой	γ	кН/м ³	17	19.4	20.4	18	19	19
Удельный вес грунта обводненный	$\gamma_{обвод}$	кН/м ³	17	19.4	20.4	20	19	19
Модуль деформации (Юнга)	E	МПа	2,85	7,6	28	40	38	36
Коэффициент Пуассона	ν	-	0.35	0.35	0.3	0.3	0.3	0.3
Сцепление	C	МПа	0.009	0.011	0.006	0.002	0.001	0.02
Угол Внутреннего трения	ϕ	град	10	11	30	38	40	40

2. Методика определения прочностных характеристик и коэффициента безопасности усиленного грунтового массива вертикальными столбами из щебня

При проектировании вертикальных столбов из щебня для получения и наиболее надежного варианта необходимо проанализировать влияние шага расстановки вертикальных столбов из щебня на прочностные характеристики грунтов основания и коэффициент безопасности сооружения.

Согласно методике, разработанной Heinz J. Priebe [6], определение характеристик усиленного массива происходит в следующей последовательности.

1. Рассчитывается коэффициент активного давления $K_{ас}$ материала вертикального столба из щебня:

$$K_{ас} = \tan^2(45^\circ - \frac{\phi_c}{2}), \quad (1)$$

где ϕ_c – угол внутреннего трения материала вертикальных столбов из щебня.

2. Рассчитывается коэффициент усиления n в зависимости от отношения площадей вертикальных столбов из щебня и усиленного массива:

$$n = 1 + \frac{A_c}{A_s} \left[\frac{5 - \frac{A_c}{A_s}}{4K_{ас}(1 - \frac{A_c}{A_s})} - 1 \right], \quad (2)$$

где A_c – площадь вертикального столба из щебня; A_s – площадь влияния вертикального столба из щебня; $K_{ас}$ – коэффициент активного давления материала вертикального столба из щебня.

² Рабочий проект. Строительство новой железнодорожной линии Обская – Салехард. ООО «Мостострой-12», 2012. – 278 с.

3. Определяется пропорциональный параметр m' :

$$m' = \frac{n-1}{n}, \quad (3)$$

где n – коэффициент усиления.

4. Определяются сцепление и тангенс угла внутреннего трения усиленного массива, на их основе рассчитывается угол внутреннего трения усиленного массива:

$$c' = (1 - m')c_s, \quad (4)$$

где c' – удельное сцепление усиленного массива; c_s – удельное сцепление грунта; m' – пропорциональный параметр.

$$\tan\varphi' = m' \cdot \tan\varphi_c + (1 - m')\tan\varphi_s, \quad (5)$$

где $\tan\varphi'$ – тангенс угла внутреннего трения усиленного массива; m' – пропорциональный параметр; $\tan\varphi_c$ – тангенс угла внутреннего трения материала вертикальных столбов из щебня; $\tan\varphi_s$ – тангенс угла внутреннего трения грунта.

Согласно [7] определяется модуль деформации усиленного массива:

$$E_{\text{мас}} = \frac{V_{\text{гр}}}{V_{\text{арм}}} * E_{\text{арм}} + \left(1 - \frac{V_{\text{гр}}}{V_{\text{арм}}}\right) * E_{\text{гр}}, \quad (6)$$

где $V_{\text{гр}}$ – объём усиливаемого массива грунта; $V_{\text{арм}}$ – объём армирующих элементов; $E_{\text{арм}}$, $E_{\text{гр}}$ – расчетные значения модуля деформации армирующих элементов (щебня) и модуля деформации грунта.

Для определения коэффициента безопасности – отношение критической (безопасной) нагрузки и эксплуатационной нагрузки в наиболее опасной зоне основания [8]:

$$K_{\text{без}} = \frac{P_{\text{кр}}}{P_3}, \quad (7)$$

где $P_{\text{кр}}$ – критическая нагрузка, воспринимаемая слабой толщиной i -го слоя основания, кН/м^2 ; P_3 – эксплуатационная нагрузка, действующая на i -й слой основания, кН/м^2 .

Согласно формуле, разработанной Виноградовым В.В. [9], эксплуатационная нагрузка определяется по формуле:

$$P_3 = P_{\text{нас}} + P_{\text{всп}} + P_{\text{тр}} + P_{\text{д.с.}}, \quad (8)$$

где $P_{\text{всп}}$ – постоянная нагрузка от верхнего строения пути или одежды, кН/м^2 ; $P_{\text{тр}}$ – временная транспортная нагрузка, кН/м^2 ; $P_{\text{нас}}$ – нагрузка от веса насыпи, кН/м^2 ; $P_{\text{д.с.}}$ – нагрузка от деятельного слоя, кН/м^2 .

При определении эксплуатационной нагрузки необходимо учесть нагрузку от веса деятельного слоя [9]:

$$P_{\text{д.с.}} = \gamma_{\text{д.с.}} \cdot h_{\text{д.с.}}, \quad (9)$$

где $h_{\text{д.с.}}$ – мощность деятельного слоя, м; $\gamma_{\text{д.с.}}$ – средний объемный вес грунта деятельного слоя, кН/м^3 .

Нагрузка от веса насыпи вычисляется по следующей формуле [9]:

$$P_{\text{нас}} = \gamma_{\text{нас}} \cdot h_{\text{нас}}, \quad (10)$$

где $h_{\text{нас}}$ – высота насыпи, м.; $\gamma_{\text{нас}}$ – средний объемный вес грунта насыпи, кН/м^3 .

Условие прочности (несущей способности) грунтов основания земляного полотна может быть определено через критическую нагрузку, которая определяется по формуле проф. Пузыревского Н.П. [10], рекомендуемой СП 32-104-98³.

$$P_{кр} = \frac{\pi(c \cdot ctg\varphi + \gamma h)}{ctg\varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}} + \gamma h, \quad (11)$$

где $P_{кр}$ – критическая для данного грунта нагрузка, кН/м²; c – удельное сцепление грунта, кПа; φ – угол внутреннего трения грунта, рад; γ – удельный вес грунта, кН/м³; h – расстояние от поверхности основания до расчетного слоя.

Если $K_{без} \leq 1$, то предлагается использовать усиление основания земляного полотна вертикальными столбами из щебня.

3. Анализ влияния шагов расстановки вертикальных столбов из щебня на прочностные характеристики грунтов основания и коэффициент безопасности сооружения

Определим наиболее оптимальный шаг расстановки вертикальных столбов из щебня для усиления грунтов основания участка Обская-Салехард, ПК 01+50 – ПК 06+50, проанализировав их влияние на прочностные характеристики грунтов основания, модуль деформации и коэффициент безопасности сооружения. Вертикальные столбы из щебня расставляются в шахматном порядке (рисунок 3). Были проанализированы шаги расстановки 2,2x1,9, 2,6x2,2 и 3,0x2,25.

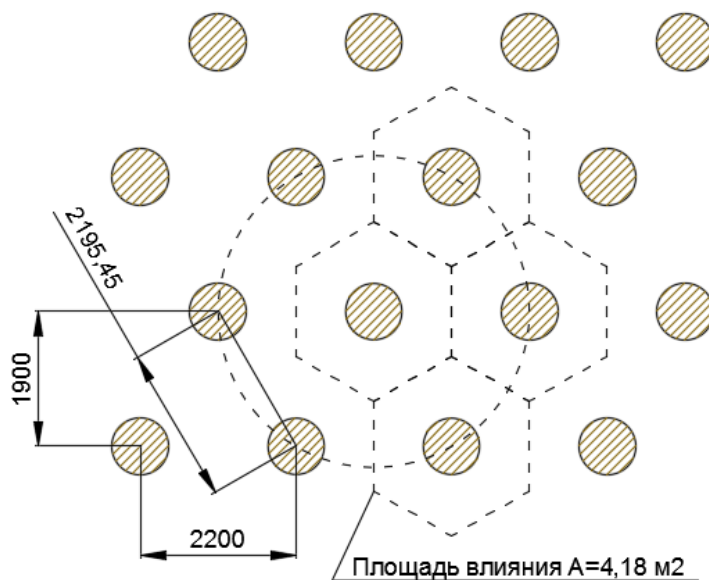


Рисунок 3. Шаг расстановки вертикальных столбов из щебня 2,2x1,9 и их площадь влияния [6]

По формулам 1–4 определим влияние различных шагов расстановки вертикальных столбов из щебня на сцепление грунтов основания. На рисунке 4 показаны диаграмма изменения удельного сцепления в грунтах с использованием различных шагов расстановки вертикальных столбов. Уменьшение удельного сцепления происходит за счет разрушения пластичных связей, поэтому чем дальше столбы находятся друг от друга, тем больше удельное сцепление. Удельное сцепление уменьшается незначительно.

³ СП 32-104-98. Проектирование земляного полотна железных дорог колеи 1520 мм. – Москва, 1998. – 74 с.

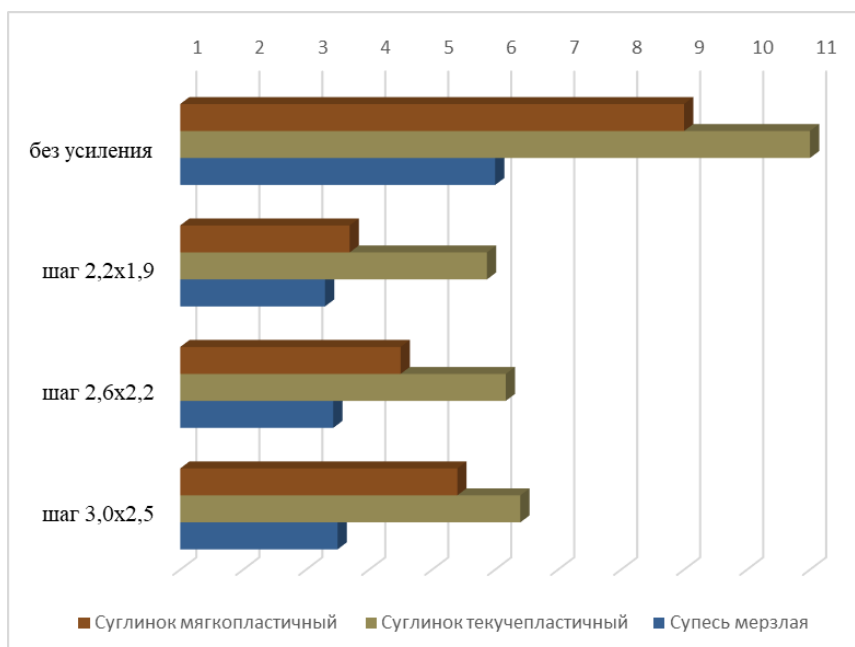


Рисунок 4. Диаграмма изменения удельного сцепления в грунтах с использованием различных шагов расстановки вертикальных столбов (разработано автором)

По формулам 1–3, 5 определим влияние различных шагов расстановки вертикальных столбов из щебня на угол внутреннего трения грунтов основания. На рисунке 5 показана диаграмма изменения угла внутреннего трения в грунтах с использованием различных шагов расстановки вертикальных столбов. Как видно из диаграммы и расчетов, чем ближе вертикальные столбы друг другу, тем больше возрастает угол внутреннего трения за счет уплотнения прилегающего к столбу грунта. Соответственно, чем меньше расстояние между вертикальными столбами, тем больше будет возрастать угол внутреннего трения.

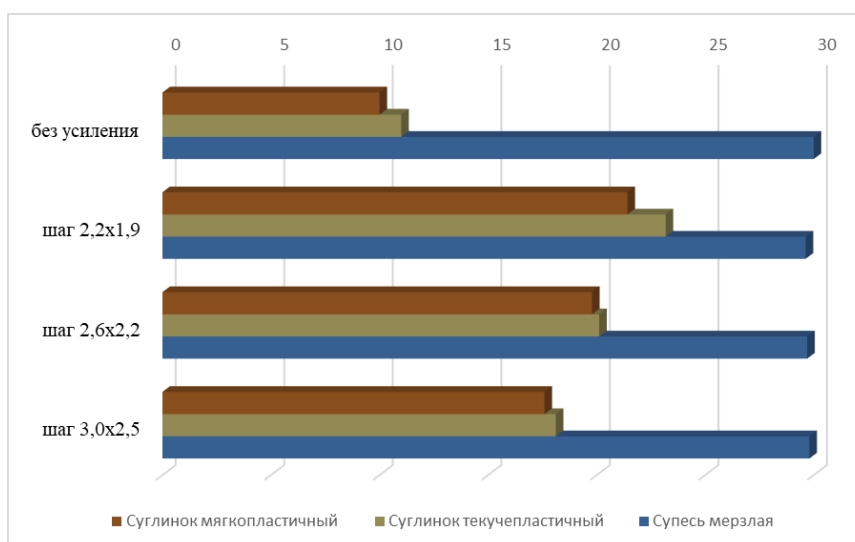


Рисунок 5. Диаграмма изменения угла внутреннего трения в грунтах с использованием различных шагов расстановки вертикальных столбов (разработано автором)

По формуле 6 определим влияние различных шагов расстановки вертикальных столбов из щебня на модуль деформации грунтов основания. На рисунке 6 показана диаграмма изменения в грунтах модуля деформации грунтов от использования различных шагов

расстановки вертикальных столбов. Как видно из диаграммы и расчетов, чем ближе вертикальные столбы друг другу, тем больше возрастает угол внутреннего трения за счет уплотнения прилегающего к столбу грунта. Соответственно, чем меньше расстояние между вертикальными столбами, тем больше будет возрастать угол внутреннего трения.

При увеличении диаметра вертикальных столбов не будет происходить заметное увеличение приведенного модуля деформации. Очевидно, что диаметр вертикальных столбов не следует увеличивать до бесконечности, это не оправдывается большим расходом инертного материала. При увеличении расстояния между центрами вертикальных столбов происходит заметное уменьшение приведенного модуля деформации. Это свидетельствует об ограничении расстояния между элементами для эффективного решения задач.

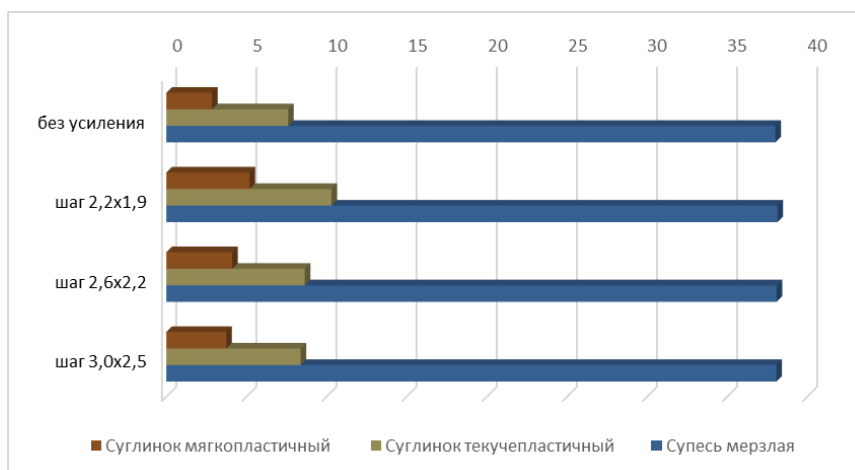


Рисунок 6. Диаграмма изменения модуля деформации грунтов от использования различных шагов расстановки вертикальных столбов (разработано автором)

По формуле 7 определим влияние различных шагов расстановки вертикальных столбов из щебня на коэффициент безопасности сооружения. На рисунке 7 показаны изменения $K_{\text{без}}$ с использованием различных схем расстановки вертикальных столбов из щебня и без использования данной технологии. Наиболее оптимальным и эффективным согласно расчёту оказалась схема расстановки вертикальных столбов из щебня 2,2x1,9, что подтверждает высокий коэффициент безопасности по сравнению с другими схемами расстановки вертикальных столбов из щебня.

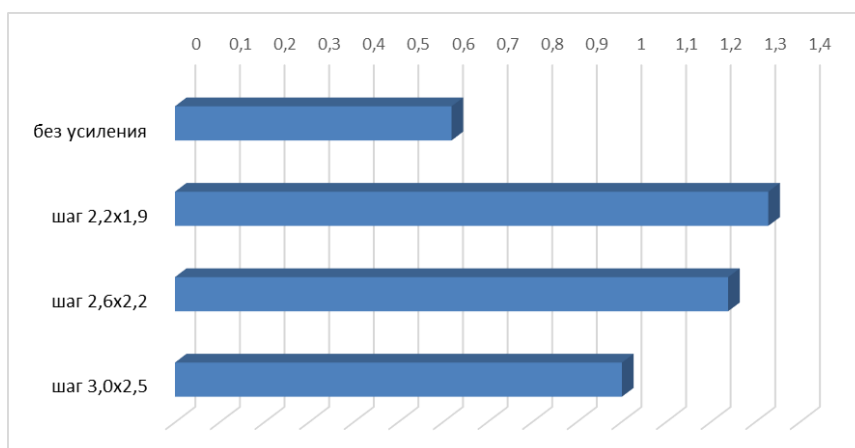


Рисунок 7. Диаграмма изменения коэффициентов безопасности с использованием различных шагов расстановки вертикальных столбов (разработано автором)

Вывод

Расчеты прочностных характеристик, модуля деформации грунтов основания и коэффициента безопасности сооружения, выполненные для трех вариантов схем расстановки вертикальных столбов из щебня позволили выбрать наиболее оптимальный шаг расстановки столбов.

Таким образом, шаг расстановки вертикальных столбов из щебня 2,2x1,9 для данного участка является эффективнее остальных. Используя шаг расстановки столбов 2,2x1,9, достигаются наиболее положительные значения, влияющие на несущую способность грунтов основания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kirsch, F., Sondermann, W. Field measurements and numerical analysis of stress distribution below stone column supported embankments and their stability / Kirsch, F., Sondermann, W. // International Workshop on Geotechnics of Soft Soils Theory and Practice. Noordwijkerhout, Netherlands. Verlag Glückauf GmbH, 2003. – P. 595–600.
2. Pivarč, J. Stone columns – determination of the soil improvement factor / Slovak journal of civil engineering. – Vol. XIX, 2011. – № 3. – P. 17–21.
3. Деген, У. Использование щебеночных и песчаных свай для усиления слабых грунтов основания транспортных сооружений / Деген У., Долгов П.Г. // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути. Труды XIV Международной научно-технической конференции. Чтения, посвященные памяти профессора Г.М. Шахунянца. – Москва, 05–06 апреля 2017. – С. 73–74.
4. Шепитько, Т.В. Армирование грунтов основания вертикальными столбами из щебня в криолитозоне / Шепитько Т.В., Артюшенко И.А., Долгов П.Г. // Мир транспорта, 2019. – Том 17, №4. – С. 68–78.
5. Шепитько Т.В., Артюшенко И.А. Влияние вертикальных столбов из щебня на криогенные процессы грунтов основания земляного полотна // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2019 №4, <https://t-s.today/PDF/10SATS419.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/10SATS419.
6. Priebe, H.J. Design of vibro replacement / Ground Engineering, Dec, 1995. – 16 p.
7. Castro, J. Modeling Stone Columns. Materials, 2017. – 10 (782). – 23 p.
8. Маслов, Н.Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов / Н.Н. Маслов. – М: Высш. школа, 1982. – 511 с.
9. Расчеты и проектирование железнодорожного пути: учебное пособие / В.В. Виноградов, Г.Г. Коншин, А.М. Никонов, Т.Г. Яковлева [и др.]. – М.: Маршрут, 2003. – 486 с.
10. Пузыревский, Н.П. Теория напряженности земляных грунтов / Н.П. Пузыревский. – СПб, 1929. – 95 с.

Artyushenko Igor Aleksandrovich

Russian university of transport, Moscow, Russia

E-mail: tywka351@mail.ru

Dependence of physico-mechanical characteristics and safety factor of the soil mass on the spacing of vertical pillars of crushed stone

Abstract. In the design, construction and further operation of communication lines on permafrost soils, the most urgent task is to ensure the reliability of the foundation of the structure. The complexity of construction in the North is due to the presence of permafrost soils in the foundations of buildings, a large number of natural barriers, extreme climatic conditions and lack of infrastructure.

In this regard, the choice of structural, technological and organizational solutions for the development of transport infrastructure, including for railways and, first of all, a deformability forecast, measures to ensure the stability of the soil base and the development of rational organizational schemes for their implementation, should be economically feasible, optimal or close to optimal for a particular engineering structure and the region of its location.

To ensure stability and sustainability of the soil base of the structure on the Northern Latitudinal Railway section of the new Obskaya-Salekhard railway line, PK 01+50 – PK 06+50, the author proposes a solution to strengthen the base soil with vertical columns of crushed stone.

This article shows the effect of vertical columns of crushed stone on the strength characteristics of permafrost soils of the base of the structure. The dependence of the strength characteristics of the soil base on the different steps of the placement of vertical columns of crushed stone is shown. The conclusion is drawn about the most optimal spacing step according to the results of calculations and comparison of various steps of arranging vertical pillars from crushed stone.

The results presented in the article are part of the dissertation research I. Artyushenko "Reinforcement of the subgrade base with vertical columns of crushed stone in areas with permafrost soils".

Keywords: subgrade; railway; highway; transport; permafrost soils; vertical columns of crushed stone; subgrade reinforcement

REFERENCES

1. Kirsch F., Sondermann W. (2003). *Field measurements and numerical analysis of stress distribution below stone column supported embankments and their stability*. Noordwijkerhout, Netherlands: Verlag Glückauf GmbH, pp. 595–600.
2. Pivarč J. (2011). Stone columns – determination of the soil improvement factor. *Slovak journal of civil engineering*, 3(19), pp. 17–21.
3. Degen U., Dolgov P.G. (2017). Ispol'zovanie shchebenochnykh i peschanykh svay dlya usileniya slabykh gruntov osnovaniya transportnykh sooruzheniy. [*Use of crushed stone and sand piles to strengthen weak soils of the base of transport facilities.*] Moscow, pp. 73–74.
4. Shepit'ko T.V., Artyushenko I.A., Dolgov P.G. (2019). Base soil reinforcement with vertical columns of crushed stone in cryolithozone. *Transport World*, 4(17), pp. 68–78 (in Russian).
5. Shepitko T.V., Artyushenko I.A. (2019). The influence of vertical columns of crushed stone on the cryogenic processes of the soil base of the subgrade. *Russian journal of transport engineering*, [online] 4(6). Available at: <https://t-s.today/PDF/10SATS419.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/10SATS419.
6. Priebe H.J. (1995). Design of vibro replacement. *Ground Engineering*, p. 16.
7. Castro J. (2017). Modeling Stone Columns. *Materials*, 10(782), p. 23.
8. Maslov N.N. (1982). *Osnovy inzhenernoy geologii i mekhaniki gruntov*. [*Fundamentals of engineering geology and soil mechanics.*] Moscow: Higher school, p. 511.
9. Vinogradov V.V., Konshin G.G., Nikonov A.M., Yakovleva T.G. and etc. (2003). *Raschety i proektirovanie zheleznodorozhnogo puti*. [*Calculations and design of the railway.*] Moscow: Route, p. 486.
10. Puzyrevskiy N.P. (1929). *Teoriya napryazhennosti zemlistykh gruntov*. [*Theory of earthy soil tension.*] Saint Petersburg, p. 95.