

DOI: 10.15593/2409-5125/2024.02.05

УДК 624.144.22

Н.В. Чмых, О.В. Третьякова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

ПОВРЕЖДЕНИЯ ПОДПОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ ГРУНТА

Статья посвящена актуальной проблеме негативного влияния природно-климатических факторов на эксплуатационное состояние подпорных стен. Значительная часть территории Российской Федерации подвержена сезонному промерзанию и морозному пучению грунтов, которые негативно влияют на работу конструкций. В процессе промерзания грунт засыпки увеличивается в объеме и создает дополнительное давление на подпорную стену, что приводит к появлению повреждений и преждевременному отказу. Промерзание подпорных сооружений происходит не только со стороны грунта засыпки, но и через тело конструкции. Несмотря на большую практическую значимость, в настоящее время проблема эксплуатации подпорных стен в условиях морозного пучения грунта засыпки недостаточно освещена в публикациях. Целью данного исследования является анализ опыта эксплуатации подпорных сооружений в зоне распространения сезоннопромерзающих грунтов и морозного пучения, а также систематизация полученных результатов. В статье выполнен обзор негативных последствий в подпорных стенах и конструкциях ограждения котлованов от воздействия сил морозного пучения на основе российской и зарубежной практики. Проведенный анализ показал, что наиболее характерными видами повреждений являются горизонтальное смещение стен и тещины в конструкциях стен. Помимо повреждений подпорных сооружений, в статье рассмотрены случаи увеличения внутренних усилий в конструкциях от влияния морозного пучения грунта. Работа имеет практическую направленность, позволяет получить представление о повреждениях подпорных стен в районах с суровым климатом, а также может послужить основой для выбора мероприятий по предотвращению негативного влияния морозного пучения грунта на эти конструкции.

Ключевые слова: подпорное сооружение, морозное пучение, сезонное промерзание грунтов, повреждение, деформация, внутренние усилия, устойчивость.

Строительство на сложном рельефе требует специальных объемно-планировочных решений, одним из которых является подготовка площадки под строительство. При строительстве на сложном рельефе участок разбивается на разноуровневые террасы, которые закрепляются подпорными сооружениями [1–3].

При проектировании подпорных сооружений большое внимание уделяется учету влияния природно-климатических факторов на работу конструкций. Недостаточный учет природно-климатических фак-

торов при проектировании подпорных сооружений может вызвать преждевременный отказ или недопустимые деформации конструкции. Одним из таких факторов является сезонное промерзание и морозное пучение грунта, которому подвержено около 40 % территории РФ [4]. В зимний период происходит распространение отрицательной температуры в толщу грунтовой засыпки и одновременная миграция влаги к фронту промерзания из талой зоны. Это приводит к возникновению и развитию напряжений и сил морозного пучения грунта. Следует отметить, что отрицательная температура распространяется не только в вертикальном, но и в горизонтальном направлении через тело подпорной стены. Таким образом, по исследованиям А.Г. Алексеева [5] при промерзании грунтовой засыпки за подпорной стенкой формируется г-образный мерзлый слой, который вызывает деформации стены.

На сегодняшний день проведен большой объем исследований работы подпорных стен в талых грунтах. Однако проблемы эксплуатации подпорных стен в условиях сезонного промерзания и морозного пучения недостаточно освещены в текущих публикациях. Поэтому целью статьи является систематизация и анализ повреждений подпорных сооружений в этих условиях.

На основе опыта эксплуатации подпорных стен и близких к ним по конструкции стен котлованов в условиях сезонного промерзания и морозного пучения можно выделить следующие основные виды повреждений:

- поднятие грунта засыпки;
- горизонтальное смещение и потеря устойчивости;
- трещины в теле подпорных стен;
- обрушение панелей;
- вертикальное смещение стены (подъем).

Поднятие грунта засыпки за подпорной стеной отмечалось в районе Чэнбэй г. Синин (Китай), где проводили полевые испытания для изучения влияния морозного пучения на свайно-анкерную конструкцию, удерживающую котлован [6]. Размер котлована составляет: длина × ширина × высота ($2 \times 2 \times 3$ м). Испытания проводились с 12 ноября по 29 декабря. Было зафиксировано поднятие грунта на максимальную величину 4,4 мм, с повышением температуры это значение уменьшилось до 4,14 мм.

Наибольшую величину поднятия грунта засыпки – 11,8 см – обнаружили в Хоккайдо (Япония) во время полевых испытаний подпорных стен уголкового типа в условиях воздействия морозного пучения [7]. Также при моделировании горизонтального смещения подпорной стены в системе ABAQUS [8] было обнаружено поднятие грунта засыпки.

Горизонтальное смещение тела подпорной стены от вертикальной оси – это наиболее часто встречающийся вид повреждений. Промерзание воды в толще грунтовой засыпки приводит к увеличению грунта в объеме. Такой процесс вызывает дополнительное горизонтальное давление на подпорную стену, которое может привести к смещению подпорной стены.

Смещение подпорных стен наблюдалось в Хоккайдо (Япония). Были проведены полевые испытания подпорных стен уголкового типа из сборных бетонных блоков. Испытания проводились на территории кампуса технологического института Китами. Всего для испытаний было возведено девять подпорных стен высотой от 1 до 4 м. Измерения производили на протяжении трех зимних сезонов с ноября 1999 по апрель 2002 г. Наклон подпорной стены от воздействия морозного пучения был зафиксирован сразу после заморозков, также наблюдалось частичное восстановление наклона после оттаивания. Максимальная величина наклона составлял $3,7^\circ$ в первый год испытаний, $5,4^\circ$ – во второй, $6,3^\circ$ – в третий. Происходило накопление остаточных деформаций морозного пучения [7].

Также подобное накопление остаточных деформаций от морозного пучения обнаружили в армогрунтовых подпорных стенах в пригороде г. Томакомай, Хоккайдо, северная Япония (рис. 1, 2) [9]. Исследовались четыре модели подпорных стен, удерживающих насыпь автомобильной дороги. Конструкции моделей подпорных стен представлены на рис. 1. Горизонтальное смещение стен измеряли в трех точках вдоль верхней и нижней поверхности стены для верхнего и среднего сегментов. Смещение наблюдалось в зимний период, а затем в летний период частично восстанавливалось, однако происходило накопление остаточных деформаций. Наименьшее смещение было зафиксировано в модели «4», наибольшее – в моделях «1» и «3».

В России горизонтальное смещение подпорных стен от вертикальной оси отметил А.Г. Алексеев [5]. На участке открытого транспортно-го тоннеля в г. Сергиев-Посаде Московской области проводи-

лись измерения горизонтального смещения конструкций «стена в грунте» из сборно-монолитного железобетона толщиной 0,83 м в зимний период 2002–2003 гг. Отклонение стены от вертикали не превысило 2,8 мм.

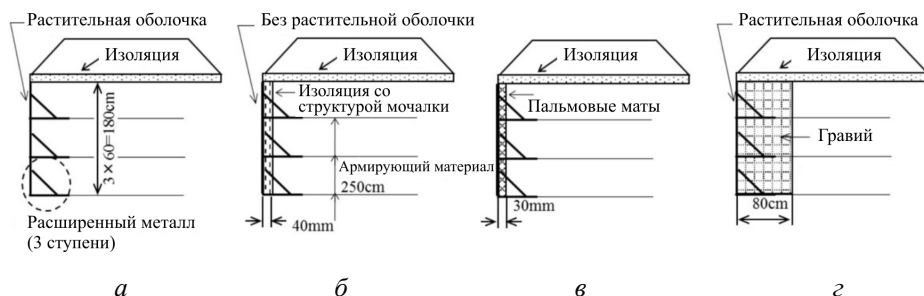


Рис. 1. Модели конструкций армогрунтовых подпорных стен:

а – без защиты от морозного пучения (модель «1»), *б* – изоляция со структурой мочалки толщиной 4 см (модель «2»), *в* – изоляция из пальмовых матов толщиной 3 см (модель «3»), *г* – замена грунта засыпки (80 см) на гравий (модель «4») [9]

На территории г. Харбина в провинции Хэйлунцзян (Китай) провели мониторинг горизонтального смещения шпунтовой стены «котлован» в зимний период [10]. Стальные шпунтовые сваи сечением I36 имели общую длину 16 м и глубину залегания 10 м. Горизонтальное смещение измерялось в три этапа: с 11.11 по 26.12, с 27.12 по 24.04 и с 25.02 по 25.04. Максимальное горизонтальное смещение на первом этапе измерения составило 5 мм, скорость прироста – 0,11 мм в сутки. На втором этапе измерения – 2 мм. На третьем этапе – 28 мм, скорость прироста составила 0,38 мм в сутки. Максимальная величина горизонтального смещения была зафиксирована в марте. В этом месяце наблюдалась большая разница между дневной и ночной температурой воздуха, что привело к возникновению циклического замораживания-оттаивания.

Смещение свайно-анкерной конструкции глубокого котлована от вертикальной оси было зафиксировано в г. Пекине (Китай) [11]. Глубина котлована составляла 25 м, длина и ширина 110 и 120 м соответственно. В верхней части котлован удерживался с помощью грунтовых нагелей (6 м), а в нижней части свайно-анкерной конструкцией (19 м). Мониторинг производился с января по март 2012 г. Максимальная величина горизонтального смещения свай составила 20–50 мм.



Рис. 2. Деформация армогрунтовой подпорной стены [9]

Потеря устойчивости уголкового подпорной стены из железобетона была смоделирована в условиях промерзания грунта засыпки [8]. Моделирование производилось в численном комплексе ABAQUS с сопоставлением результатов расчета с испытаниями грунта. Результаты моделирования показаны на рисунке 3. Величина горизонтального смещения стены в верхней точке составила 0,208 м. Это объясняется характерным распределением сил морозного пучения за подпорной стеной, максимальное значение которых, как правило, наблюдается у поверхности грунта.

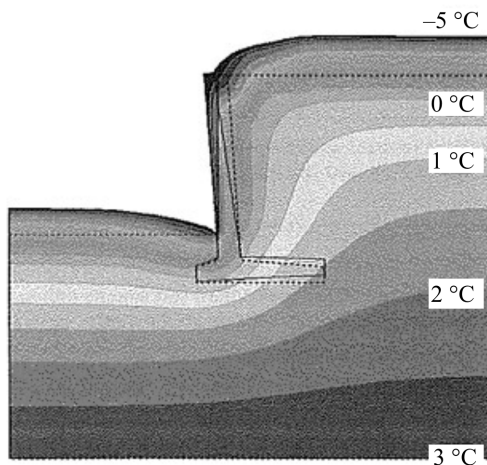


Рис. 3. Горизонтальное смещение подпорной стены, полученное при моделировании в численном комплексе ABAQUS [8]

Трещины являются следующим видом повреждений, который характерен для подпорных стен из бетона. Промерзший грунт оказывает дополнительное давление на тело и подошву подпорных стен. На образование трещин влияют как силы морозного пучения, так и перепад температур в бетоне.

А.Г. Алексеев [5] отмечает наличие трещин в железобетонной подпорной стене в г. Сергиев-Посаде Московской области после зимнего периода наблюдений. Ширина раскрытия трещин достигала 10 мм.

В Хоккайдо (Япония) наблюдалось появление трещин в нижней части подпорной стены [7]. Образование трещин было вызвано горизонтальным давлением морозного пучения. Мониторинг проводился в течение трех зимних сезонов. После первого зимнего сезона появились вертикальные трещины, работы по заделке трещин в конструкции не проводились. После второго сезона увеличилось количество вертикальных трещин, а также увеличилась ширина раскрытия трещин, появившихся после первого сезона (рис. 4). После третьего сезона наблюдений, помимо образования новых вертикальных трещин, появились горизонтальные трещины. Негативным последствием образования трещин является достижение конструкцией подпорной стены предельного состояния.

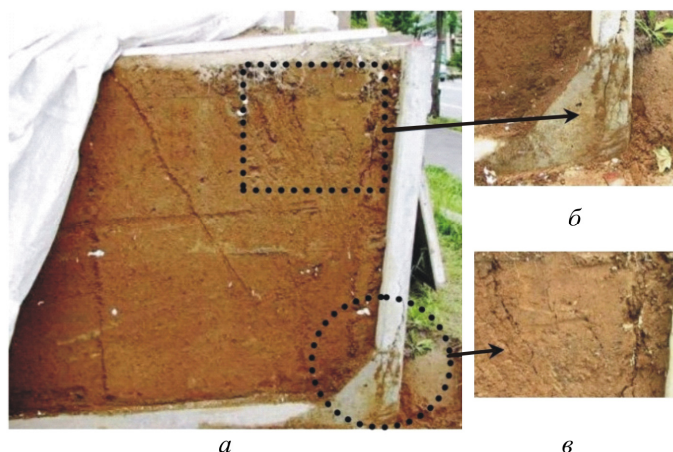


Рис. 4. Трещины в подпорной стене углового типа от воздействия морозного пучения: а – поперечное сечение грунта засыпки, б – трещины в бетоне, в – след распространения линз льда [7]

Случаи обрушения панелей отмечаются в практике эксплуатации подпорных стен в зимних условиях. В США обнаружен случай обрушения панелей бетонных панелей подпорной стены из грунта, армированного оцинкованными стальными пластинами. Панели имеют квадратную форму с длиной стороны 1,5 м и толщиной 180 мм. Подпорная стена устроена на территории шахты. Для определения причин обрушения W.J. Neely [12] проанализировал опыт эксплуатации объекта с момента строительства в конце 1970-х гг. по 2006 г. В 1986 г. было зафиксировано обрушение бетонных плит на одном из участков подпорной стены в верхней части (высота стены на этом участке составляет 11,2 м). Обрушение панелей произошло ранней весной, ему предшествовало выпучивание панелей. В местах обрушения панелей наблюдалась просадка грунта засыпки из-за просачивания воды через стыки панелей в весенний период. Также произошло разрушения полос армирования. В 1987 г. произошло обрушение семи панелей в том же месте (рис. 5). В месте обрушения образовалось углубление глубиной 1–1,5 м в массиве грунта засыпки на протяжении 5 м. Полосы армирования не подверглись деформациям. В 1986 и 1987 гг. производились ремонтные работы по замене панелей и грунта засыпки. В 2006 г. было зафиксировано смещение бетонных панелей в том же месте на величину 25–75 мм. При обследовании обнаружили скопление воды от таяния снега за смещенными панелями. Причиной обрушения является увеличение давления морозного пучения грунта засыпки на подпорную стену.



Рис. 5. Результат обрушения панелей подпорной стены [12]

Вертикальное смещение подпорной стены, т.е. подъем, может произойти при совместном действии нормальных и касательных сил морозного пучения. Случай вертикального смещения зафиксирован в Хоккайдо (Япония) [7]. С ростом ширины раскрытия трещин в нижней части стены увеличивалось ее отклонение от вертикали.

Вертикальное смещение подпорной стены было получено в результате моделирования процесса морозного пучения в ABAQUS [8]. Моделирование производилось при температуре наружного воздуха – 3 °С. Отмечен рост величины вертикального смещения при понижении температуры наружного воздуха (рис. 6).

В г. Брунсвик (штат Мэн, США) были произведены исследования воздействия морозного пучения на работу подпорных стены с грунтовыми нагелями на участке автомобильной дороги «обход Брунсвик – Топшем» в 1996 г. [13]. Напряжения в грунтовых нагелях в зимний период существенно увеличились. Отмечен случай, когда нагрузка на нагель удвоилась по сравнению с летним периодом. Максимальное значение напряжения в грунтовом нагеле составило 146 МПа. Каждый последующий цикл промерзания-оттаивания вызывает все более высокие напряжения, если только напряжение в нагелях не снизить механическим путем после зимнего сезона.

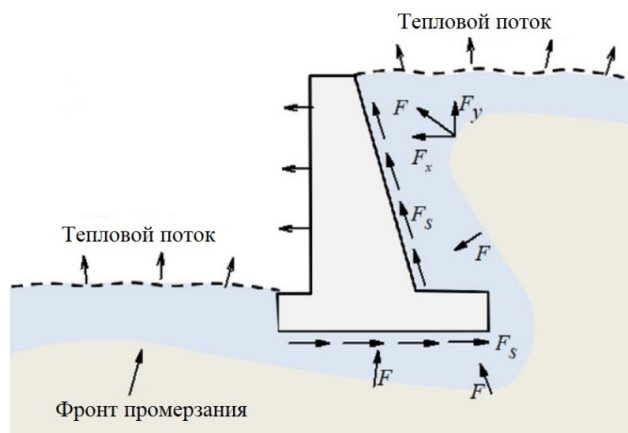


Рис. 6. Схема воздействия сил морозного пучения на подпорную стену [14]

В Китае провели лабораторные исследования влияния количества циклов замораживания-оттаивания на работу анкерных болтов в кон-

струкции, удерживающей горный склон [15]. В лабораторных условиях были проведены испытания на выдергивание анкера из цементной заливки после 0, 5, 10, 15 и 30 циклов замораживания-оттаивания. Среднее значение выдергивающей нагрузки для каждой группы составило 94, 90, 88, 80 и 68 кН после 0, 5, 10, 15 и 30 циклов замораживания-оттаивания. С увеличением количества циклов наблюдалось снижение несущей способности анкерного болта. После 30 циклов несущая способность уменьшилась на 27 %. Наибольшая концентрация напряжений зафиксирована в середине болта, это говорит о вероятном разрушении именно в этом месте при увеличении числа циклов замораживания-оттаивания.

В районе Чэнбэй г. Синин (Китай) помимо поднятия грунта засыпки был зафиксировано увеличение напряжений и изгибающего момента в свайно-анкерной конструкции [6] при промерзании и морозном пучении. Максимальная величина напряжений наблюдалась на расстоянии 0,5 м от верхней границы сваи и составила 2 МПа со свободной стороны и 14 МПа со стороны засыпки. Максимальный изгибающий момент в верхней части сваи достигал 6000 Н·м. При действии сил морозного пучения предварительное напряжение анкера постепенно снижалось, что привело к увеличению усилий в свае.

Увеличение усилий в анкерах наблюдалось в свайно-анкерной конструкции глубокого котлована в г. Пекине (Китай) [11]. Величина этих усилий в среднем увеличилась на 195 кН, что составляет 90 % от первоначального значения.

С.В. Метелкин и В.Н. Парамонов [16] провели натурные измерения усилий в распорках котлована. Ограждение котлована выполнено из шпунтовых свай корытного типа длиной 12 м, глубина котлована 8 м. Измерения проводились в зимний период 2018–2019 гг. Усилия в распорках измеряли с помощью тензометрических датчиков. Значения усилий при положительных температурах воздуха составили 204–383 кН, при отрицательных температурах воздуха – 418–780 кН. Авторы отмечают, что увеличения усилия в распорках удвоились под влиянием сил морозного пучения.

Выводы. На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что наиболее характерным видом повреждения подпорных сооружений является горизонтальное смещение подпорных стен и образование трещин с недопустимой шириной раскрытия. Кроме того, зафикси-

ровано повышение усилий в элементах свайно-анкерных конструкций и снижение их несущей способности при действии сил морозного пучения грунта. Систематизация выявленных повреждений от морозного пучения представлена в таблице.

Повреждения подпорных сооружений от морозного пучения с учетом материала и расположения сооружений

Показатель	Параметр	Количество зафиксированных случаев за период с 1986 по 2020 гг.
Вид повреждений	Горизонтальное смещение	6
	Поднятие грунта засыпки	3
	Раскрытие трещин	2
	Вертикальное смещение стен	2
	Обрушение панелей	1
Материал подпорных сооружений	Бетон или железобетон	3
	Свайно-анкерная конструкция или с применением анкеров	3
	Армированный грунт	2
	Шпунт	2
	Грунтовые нагели	1
Географическое расположение	Китай	4
	Россия	2
	США	2
	Япония	2

Причинами повреждений подпорных стен являются следующие: сезонное промерзание и пучение грунта засыпки; изменение свойств грунта засыпки в процессе эксплуатации, приводящее к увеличению его пучинистости; недостаточный учет водно-теплого режима конструкции на этапе проектирования, а также отсутствие или неисправность дренажной системы.

Для снижения негативного влияния морозного пучения на подпорные сооружения могут быть использованы такие методы, как устройство теплоизоляции, замена грунта засыпки на непучинистый, обеспечение исправной работы дренажных систем, увеличение толщины стены. Вместе с тем можно добиться снижения сил пучения на поверхности подпорных стен за счет их рациональных конфигураций, предусмотренных еще на стадии проектирования.

Направлением дальнейших исследований является развитие таких превентивных конструктивных методов снижения влияния морозного пучения на подпорные сооружения.

Библиографический список

1. Дуброва, Г.А. Методы расчета давления грунтов на транспортные сооружения / Г.А. Дуброва. – М: Транспорт, 1969. – 232 с
2. Клейн, Г.К. Расчет подпорных стен / Г.К. Клейн. – М.: Высшая школа, 1964. – 196 с.
3. Тетиор, А.Н. Облегченные подпорные стены в транспортном строительстве / А.Н. Тетиор. – М.: Транспорт, 1987. – 79 с.
4. Абжалимов, Р.Ш. Закономерности взаимодействия пучинистого грунтового основания с фундаментами малоэтажных зданий и подземными сооружениями и методы их расчета: авторефер. дис. ... д-ра тех. наук: 05.23.02 / Р. Ш. Абжалимов; Моск. гос. ун-т путей сообщения. – М., 2011. – 47 с.
5. Алексеев, А. Г. Определение горизонтального давления грунта на подпорные стены при сезонном промерзании-оттаивании: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.08 / А.Г. Алексеев; ОАО «ПНИИИС». – М., 2006. – 190 с.
6. Analysis of Internal Force and Displacement of Foundation Pit Pile Anchor Supporting Structure Based on Soil Frost Heaving / D. Shi, Y. Li, X. Gao, S. Li, T. Xiang // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – № 580. – P. 1–8. DOI: 10.1088/1755-1315/580/1/012028
7. Full-Scale Model Test on Prevention of Frost Heave of L-Type Retaining Wall / D. Rui, H. Deng, D. Nakamura, S. Yamashita, T. Suzuki, and H. Zhao // Cold Regions Science and Technology. – 2016. – Vol. 132. – P. 89–104.
8. Michalowski, R. Modelling of Freezing in Frost-Susceptible Soils. Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences / R. Michalowski, M. Zhu // Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences. – 2006. – Vol. 13. – P. 613–625.
9. Long-Term Measurement of Frost-Heave Deformation in Geotextile-Reinforced Soil Walls / A. Sato, T. Yamanashi, T. Suzuki, N. Tatta, T. Kubo // 11th International Conference on Geosynthetics 2018, ICG 2018 – Seoul, Republic of Korea, Korean Geosynthetics Society. – 2018. – Vol. 3. – P. 2225–2233.
10. Effect of Freeze–Thaw Cycles on Deformation Properties of Deep Foundation Pit Supported by Pile-Anchor in Harbin / G. Cui, S. Ma, Z. Lui, S. Lui, C. Xi, Z. Cheng // Reviews on Advanced Materials Science. – 2022. – Vol. 61, no. 1. – P 756–768. DOI: 10.1515/rams-2022-0266
11. Frost Heaving Deformation Control of Pile-Anchor Retaining Structure of Deep Foundation Pits in Seasonal Frozen Soil Regions / Z. Zhang, L. Ma, X. Han, J. He // Chinese Journal of Geotechnical Engineering. – 2012. – 34 (suppl). – P. 65–71.
12. Neely, W. Collapse of MSE Wall Panels due the Effects of Freezing Temperatures / W. Neely // ASCE Earth Retention Conference 3, Bellevue, WA. – 2011. – P. 580–587. DOI: 10.1061/41128(384)59
13. Duchesne, S.M. Effects of Frost Heave on a Soil Nail Wall in Brunswick, Maine [Электронный ресурс] / S.M. Duchesne // Master's thesis. – Maine, 2003. – 185 p. – URL: <http://digital-commons.library.umaine.edu/etd/119> (дата обращения: 13.02.2024).
14. Freeze-thaw cycling impact on the shear behavior of frozen soil-concrete interface / P. He, Y. Mu, Z. Yang, W. Ma, J. Dong, Y. Huang // Cold Regions Science and Technology. – 2020. – Vol. 173. – P. 1–11. DOI: 10.1016/j.coldregions.2020.103024
15. Experimental and Numerical Investigation on the Deterioration Mechanism for Grouted Rock Bolts Subjected to Freeze – Thaw Cycles / J. Yuan, C. Ye, J. Yang, Z. Xie, J. Lui, S. Wang,

Y. Lui // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2021. – Vol. 80. – P. 5563–5574. DOI: 10.1007/s10064-021-02279-2

16. Метелкин, С.В. Морозное пучение и его влияние на распорную систему ограждающих конструкций глубоких котлованов / С.В. Метелкин, В.Н. Парамонов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2022. – Т. 19, № 1. – С. 133–142. – DOI: 10.20295/1815-588X-2022-19-1-133-142.

References

1. Dubrova G. A. Metody rascheta davleniia gruntov na transportnye sooruzheniia [Methods of calculating soil pressure on transportation structures]. Moscow, Transport, 1969, 232 p.

2. Klein G. K. Raschet podpornyh sten [Calculation of retaining walls]. Moscow, Vysshiaia shkola, 1964, 196 p.

3. Tetior A. N. Oblegchennye podpornye steny v transportnom stroitel'stve [Lightweight retaining walls in transportation construction]. Moscow, Transport, 1987, 79 p.

4. Abzhalmov R. S. Zakonomernosti vzaimodejstviia puchinistogo gruntovogo osnovaniia s fundamentami malojetaznykh zdaniy i podzemnymi sooruzhenijami i metody ih rascheta [Regularities of interaction of the rocky soil base with foundations of low-rise buildings and underground structures and methods of their calculation]. Abstract of Doctor's degree dissertation. Moscow, 2011, 47 p.

5. Alekseev A. G. Opredelenie gorizontalnogo davleniia grunta na podpornye steny pri sezonnom promerzanii-otтаivanii [Determination of horizontal soil pressure on retaining walls under seasonal freezing-thawing conditions]. Ph. D. degree thesis. Moscow, 2006, 190 p.

6. Shi D., Li Y., Gao X., Li S., Xiang T. Analysis of Internal Force and Displacement of Foundation Pit Pile Anchor Supporting Structure Based on Soil Frost Heaving. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 580 (2020) 012028. 2020, pp. 1-8. DOI: 10.1088/1755-1315/580/1/012028.

7. Rui D., Deng H., Nakamura D., Yamashita S., Suzuki T., Zhao H. Full-Scale Model Test on Prevention of Frost Heave of L-Type Retaining Wall. *Cold Regions Science and Technology*. 2016, Vol. 132, pp. 89–104.

8. Michalowski R., Zhu M. Modelling of Freezing in Frost-Susceptible Soils. Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences. *Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences*. 2006, Vol. 13, pp. 613-625.

9. Sato A., Yamanashi T., Suzuki T., Tatta N., Kubo T. Long-Term Measurement of Frost-Heave Deformation in Geotextile-Reinforced Soil Walls. *11th International Conference on Geosynthetics 2018, ICG 2018 - Seoul, Republic of Korea, Korean Geosynthetics Society*. 2018, Vol. 3, pp. 2225-2233.

10. Cui G., Ma S., Lui Z., Lui S., Xi C., Cheng Z. Effect of Freeze-Thaw Cycles on Deformation Properties of Deep Foundation Pit Supported by Pile-Anchor in Harbin. *Reviews on Advanced Materials Science*. 2022, Vol. 61, no. 1, pp 756-768. doi: 10.1515/rams-2022-0266.

11. Zhang Z., Ma L., Han X., He J. Frost Heaving Deformation Control of Pile-Anchor Retaining Structure of Deep Foundation Pits in Seasonal Frozen Soil Regions. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*. 2012, 34 (suppl), pp. 65-71. (In Chinese).

12. Neely W. Collapse of MSE Wall Panels due the Effects of Freezing Temperatures. *ASCE Earth Retention Conference 3, Bellevue, WA*. 2011, pp. 580-587. DOI: 10.1061/41128(384)59.

13. Duchesne S. M. Effects of Frost Heave on a Soil Nail Wall in Brunswick, Maine. Master's thesis. Maine, 2003, 185 p, available at: URL: <http://digitalcommons.library.umaine.edu/etd/119> (accessed 13 February 2024).

14. He P., Mu Y., Yang Z., Ma W., Dong J., Huang Y. Freeze-thaw cycling impact on the shear behavior of frozen soil-concrete interface. *Cold Regions Science and Technology*. 2020, Vol. 173, pp. 1-11. DOI: 10.1016/j.coldregions.2020.103024.

15. Yuan J., Ye C., Yang J., Xie Z., Lui J., Wang S., Lui Y. Experimental and Numerical Investigation on the Deterioration Mechanism for Grouted Rock Bolts Subjected to Freeze–Thaw Cycles. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2021, Vol. 80, pp. 5563–5574. DOI: 10.1007/s10064-021-02279-2.

16. Metelkin S. V., Paramonov V. N. Moroznoe puchenie i ego vlijanie na raspornuju sistemu ograzhdajushhih konstrukcij glubokih kotlovanov [Frost heaving and its influence on the spacing system of deep pit enclosures]. *Izvestija Peterburgskogo universiteta putej soobshhenija*. 2022, Vol. 19, no. 1, pp. 133–142, DOI: 10.20295/1815-588X-2022-19-1-133-142. – EDN GOIOCP.

N. Chmykh, O. Tretiakova

DAMAGE TO RETAINING WALLS UNDER CONDITIONS OF SOIL FROST HEAVE

The article is devoted to the urgent problem of the negative impact of natural and climatic factors on the operational condition of retaining walls. A significant part of the territory of the Russian Federation is subject to seasonal freezing and frost heaving of soils, which negatively affect the operation of structures. In the process of freezing the backfill soil increases in volume and creates additional pressure on the retaining wall, which leads to damage and premature failure. Freezing of retaining structures occurs not only on the backfill soil side, but also through the body of the structure. Despite the great practical significance, at present the problem of retaining walls operation under conditions of frost heaving of the backfill soil is not sufficiently covered in publications. The purpose of this study is to analyze the experience of retaining structures operation in the zone of seasonally freezing soils and frost heave distribution, as well as to systematize the obtained results. The article reviews the negative consequences in retaining walls and pit enclosure structures from the impact of frost heave forces on the basis of Russian and foreign practice. The analysis showed that the most characteristic types of damage are horizontal displacement of walls and cracks in wall structures. In addition to the damage of retaining structures, the article considers cases of increase of internal forces in structures from the influence of soil frost heave. The work has a practical orientation, allows to get an idea of the damage of retaining walls in areas with severe climate, and can also serve as a basis for the selection of measures to prevent the negative impact of frost heave on these structures.

Keywords: retaining wall, frost heaving, seasonal freezing of soils, damage, deformation, internal forces, stability.

Чмых Никита Вячеславович (Пермь, Российская Федерация) – аспирант кафедры «Автомобильные дороги и мосты», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: chmyhnikita@gmail.com).

Третьякова Ольга Викторовна (Пермь, Российская Федерация) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильные дороги и мосты», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: olga_wsw@mail.ru).

Nikita Chmykh (Perm, Russian Federation) – Postgraduate student of the Department Roads and Bridges, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: chmyhnikita@gmail.com).

Olga Tretiakova (Perm, Russian Federation) – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department Roads and Bridges, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: olga_wsw@mail.ru).

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.

Поступила: 19.04.2024

Одобрена: 21.05.2024

Принята к публикации: 28.05.2024

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:
Чмых, Н.В. Повреждения подпорных сооружений в условиях морозного пучения грунта /
Н.В. Чмых, О.В. Третьякова // Вестник Пермского национального исследовательского
политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2024. – № 2. –
С. 61–74. DOI: 10.15593/2409-5125/2024.02.05

Please cite this article in English as: Chmykh N., Tretiakova O. Damage to retaining walls
under conditions of soil frost heave. *PNRPU Bulletin. Applied ecology. Urban development*,
2024, no. 2, pp. 61-74. DOI: 10.15593/2409-5125/2024.02.05