



УДК 624.137.5

Н. В. ЧМЫХ, ст. преп. кафедры «Строительный инжиниринг и материаловедение», ст. преп. кафедры «Автомобильные дороги и мосты», аспирант; **О. В. ТРЕТЬЯКОВА**, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Строительный инжиниринг и материаловедение»

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПОДПОРНЫХ СТЕН ПРИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ НАГРУЗКЕ ОТ СИЛ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ

ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Россия, 614990, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29.

Тел.: (342) 2-391-341; эл. почта: Chmykh.n.v@yandex.ru; olga_wsw@mail.ru

Ключевые слова: подпорные стены, морозное пучение, горизонтальные нагрузки, устойчивость конструкции.

Статья посвящена исследованию конфигураций подпорных стен, испытывающих воздействие статических горизонтальных нагрузок, а также сезонных явлений, таких как морозное пучение. В работе рассматриваются конструктивные решения, включая стены с обратным уклоном, переменным сечением и ломаным профилем, способствующие перераспределению нагрузок и снижению деформаций. Особое внимание уделено анализу влияния конфигурации подпорной стены на характер распределения давления грунта. На основе обзора отечественных и зарубежных исследований определены характерные конструктивные особенности подпорных стен, эффективные в условиях дополнительной горизонтальной нагрузки.

Введение

Горизонтальными являются следующие нагрузки: активное и пассивное давление грунта; распределенная и сосредоточенная нагрузка; силы морозного пучения, нормальные к боковой поверхности стены; давление воды; сейсмические нагрузки и др. Часть из этих нагрузок имеет временный или сезонный характер. Следовательно, напряженно-деформированное состояние подпорной стены изменяется, что требует учета при проектировании сооружений.

Одним из случаев изменения напряженно-деформированного состояния при эксплуатации подпорных стен является появление сил морозного пучения [1]. Замерзшая вода в грунте увеличивается в объеме, что приводит к увеличению давления на конструкцию [2]. В отличие от активного давления грунта, значение которого увеличивается по глубине, силы морозного пучения имеют максимальное значение вблизи поверхности и убывают по глубине, как это показали в своих исследованиях Абжалимов Р. Ш. [3], Голли О. Р. [4], Невзоров А. Л. [5], Орлов В. О. [6] и другие авторы. Увеличение усилий в конструкциях подпорных стен, а также появление деформаций от воздействия сил морозного пучения отмечают Метелкин С. В. и Парамонов В. Н. [7], Sato A. [8], Shi D. [9], Rui D. [10] и другие ученые.

Ранее авторы статьи проанализировали методы снижения сил пучения на поверхности подпорных стен [11]. В результате оценки по критериям технологичности и долговечности наиболее эффективным методом отмечено

изменение конфигурации подпорных стен на этапе проектирования с целью получения дополнительных позитивных факторов. Целью данной статьи является обобщение конструктивных особенностей подпорных стен при горизонтальной нагрузке, характерной, в том числе, для условий морозного пучения.

Конструктивные особенности подпорных стен при дополнительной горизонтальной нагрузке

Цимбельман Н. Я. и Эстрин Л. З. [12] разработали конструкцию подпорной стены, которая за счет смещения центра тяжести создает сопротивление силам морозного пучения грунта (рис. 1). Такие конструкции подпорных стен называют «Наклоненные в сторону засыпки». Вследствие этого появляется горизонтальная сила и момент, которые снижают воздействие сил морозного пучения на поверхности сооружения. Следует отметить, что традиционные конструкции гравитационных подпорных стен обеспечивают равновесие сооружения только за счет собственного веса.

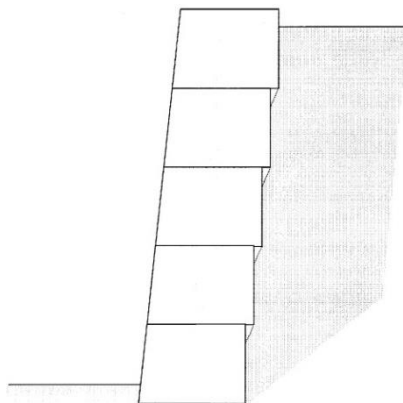


Рис. 1. Конструкция подпорной стены из сборных блоков [12]

Подпорные стены, наклоненные в сторону засыпки, также используют в качестве удерживающего сооружения железнодорожной насыпи в Китае (рис. 2), как показано в исследованиях *Changjian T.* [13] и *Feng G.* [14]. При движении подвижного состава возникает дополнительная кратковременная нагрузка. Под воздействием нагрузки от поезда происходит смещение подпорной стены на величину до 0,2 мм верхней части стены. Следовательно, конструкция подпорной стены, наклоненная в сторону засыпки, эффективна при воздействии дополнительной горизонтальной нагрузки. *Lyu P.* и коллеги [15] также отмечают, что угол наклона подпорной стены влияет на ее устойчивость, однако отдают предпочтение устройству фундаментной плиты для обеспечения большей надежности. Применение подпорных стен с наклоном тыловой грани в сторону засыпки также приведены в монографиях Клейна Г. К. [16] и Российского В. А. [17].

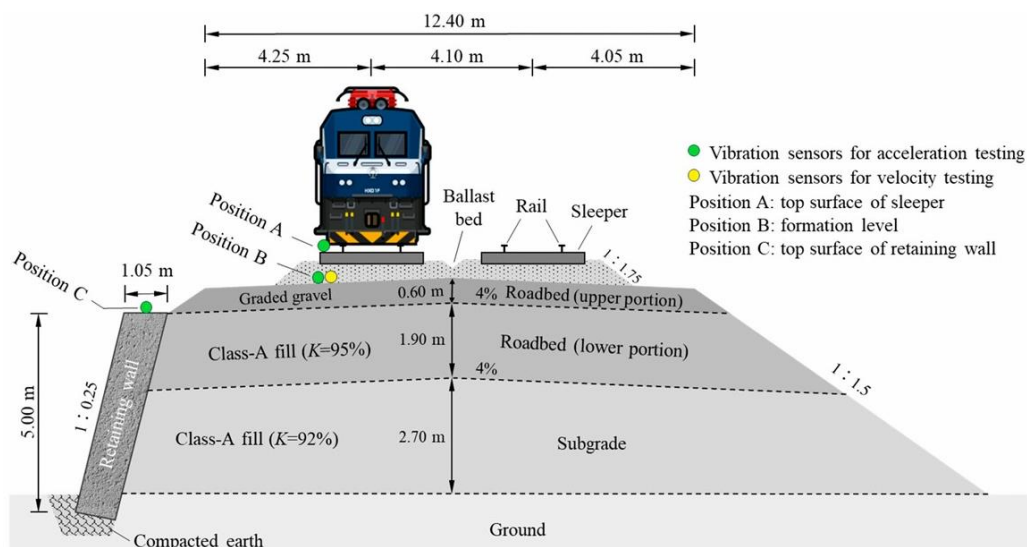


Рис. 2. Сечение подпорной стены, удерживающей железнодорожную насыпь [13]

Иманалиев Т. Б. и коллектив авторов [18] предложили использовать полурадияльную конструкции подпорной стены для перераспределения дополнительного динамического давления (рис. 3).

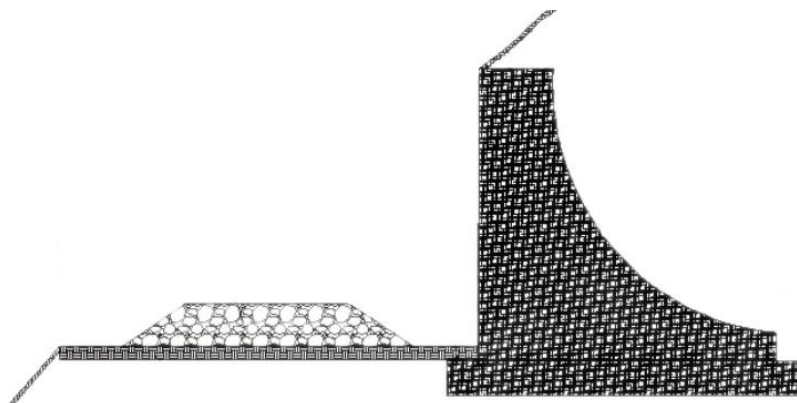


Рис. 3. Полурадияльная конструкция подпорной стены [18]

Greco V. R. [19], а также *Kolathayar S.* и *Ghosh P.* [20] исследовали влияние сейсмического воздействия на подпорные стены с ломаным профилем, верхняя часть которого имеет наклон в сторону засыпки (рис. 4).

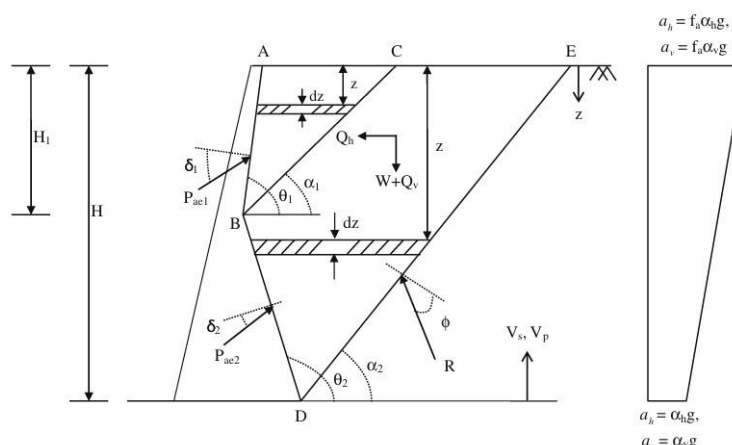


Рис. 4. Расчетная схема подпорной стены с профилем переменного сечения и уклоном сторону засыпки [20]

Santhoshkumar G. и *Ghosh P.* [21] проанализировали работу подпорной стены с ломаным профилем (рис. 5). Придание боковой поверхности двустороннего уклона позволяет включить в работу вес грунта и создать дополнительный позитивный фактор за счет уменьшения опрокидывающего момента и горизонтальной силы. Проведено сравнение величины опрокидывающего момента в зависимости от конфигурации стены. Наибольшее снижение опрокидывающего момента показала подпорная стена, наклоненная в сторону засыпки.

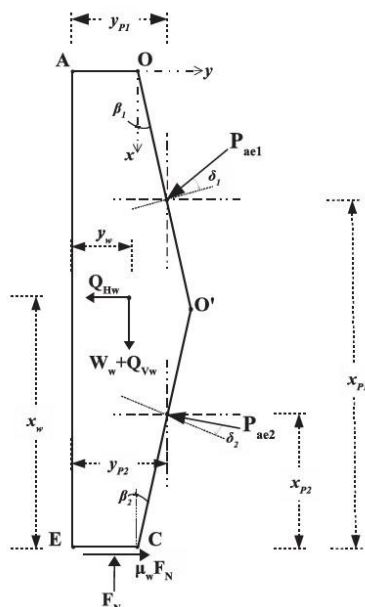


Рис. 5. Поперечное сечение подпорной стены с двухсторонним наклоном боковой поверхности [21]

Krishnan K. и *Chakraborty D.* [22] оценили работу подпорных стен с различным уклоном задней грани. Критерием оценки являлась величина сопротивления подпорной стены опрокидыванию. Были рассмотрены четыре

конструкции стены с различным уклоном задней грани (рис. 6): вертикальная ($\beta=0^\circ$); с положительным уклоном ($\beta=20^\circ$); с отрицательным уклоном ($\beta=20^\circ$); с ломаным профилем ($\beta_1=\beta_2=20^\circ$). В основе расчета лежит аналитическое уравнение пассивного давления засыпки для подпорных стен с ломаным профилем Соколовского В. В. [23]. Показано, что подпорная стена с отрицательным уклоном задней грани имеет наибольшую устойчивость и наименее подвержена опрокидыванию из-за смещения центра тяжести конструкции. Отмечается, что стена с ломаным профилем также имеет высокую устойчивость. При этом придание стене ломаного профиля и выбор оптимальной конфигурации позволит снизить материалоемкость конструкции и добиться необходимой устойчивости.

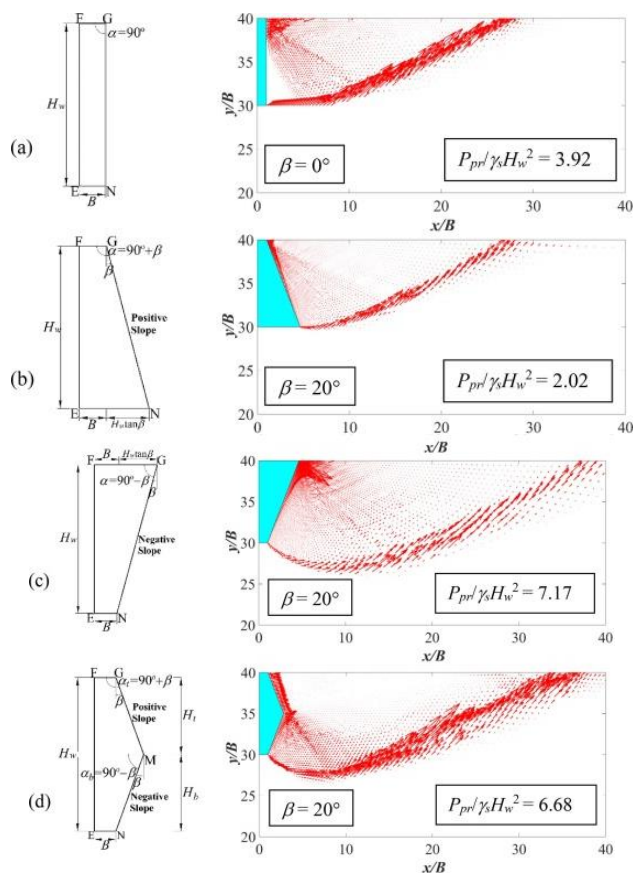


Рис. 6. Соппротивление подпорных стен с различным наклоном боковой поверхности [22]

Kalmykov O. и *Khalife R.* [24] проанализировали влияние конфигурации задней грани подпорной стены на изменение эпюры горизонтального давления от засыпки. Угол наклона задней грани стены оказался определяющим параметром, от которого зависит форма эпюры давления на сооружение. Изменение конфигурации подпорной стены определяет профиль эпюры давления (рис. 7).

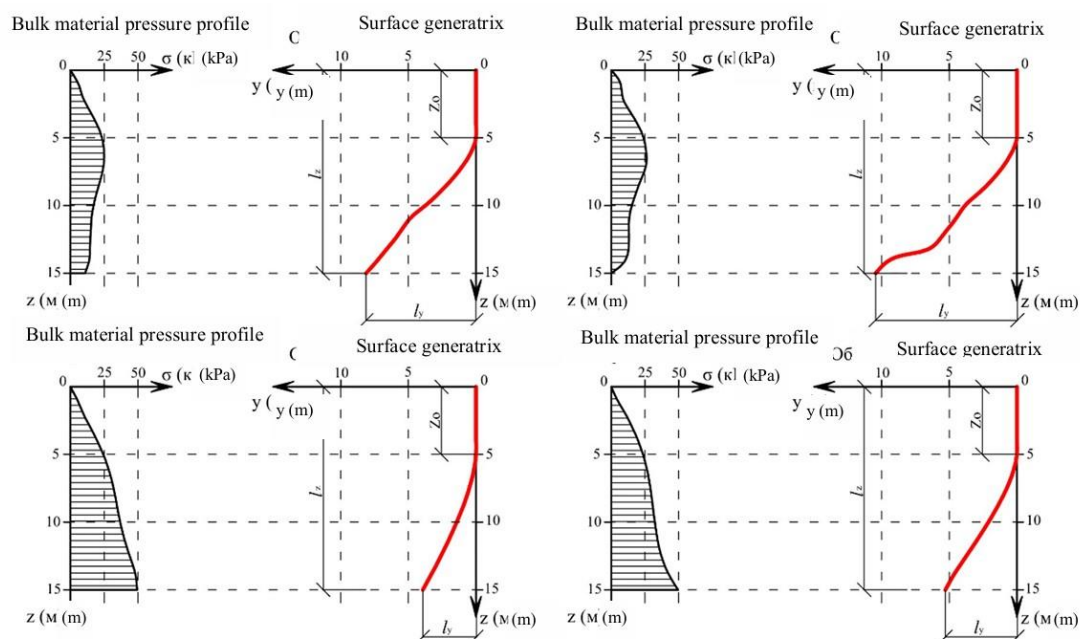


Рис. 7. Различные конфигурации поверхностей задней поверхности подпорной стенки и соответствующие профили бокового давления засыпки [24]

Еще один вариант конфигурации подпорной стены (рис. 8) в условиях дополнительной нагрузки предложил Кожин Ю. П. [25]. За счет смещения центра тяжести и придания боковой поверхности ломаного профиля повышается устойчивость сооружения.

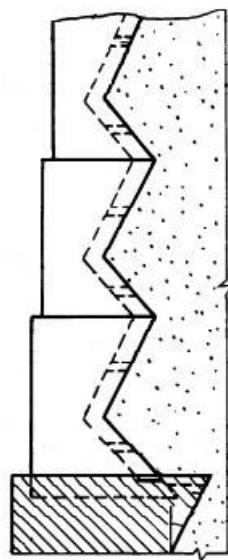


Рис. 8. Поперечное сечение подпорной стены с ломаной боковой поверхностью [25]

Результаты

Традиционные конструкции подпорных стен вертикальны или включают уширение в нижней части стены. Это связано с тем, что эпюра активного



давления грунта имеет форму треугольника с наибольшим значением у подошвы стены. Такие конструктивные особенности способствуют повышению жесткости стены в зоне наибольшего давления от засыпки, но показывают низкую эффективность при воздействии горизонтальных сил морозного пучения.

Тогда как сооружения, рассчитанные на воздействие дополнительной горизонтальной нагрузки, позволяют эффективно воспринимать и активное давление грунта и силы морозного пучения. Это может быть достигнуто за счет уширения верхней части стены. Еще одним вариантом может быть конструкция подпорной стены ломаного профиля с одновременным уширением сверху и снизу, такая конструкция позволит эффективно воспринимать нагрузку от активного давления и сил морозного пучения грунта. Эффективным способом сопротивления горизонтальному воздействию является наклон сооружения в сторону этой нагрузки.

Заключение

Проведенное исследование показало, что характерными конструктивными особенностями подпорных стен в условиях дополнительной горизонтальной нагрузки от сил морозного пучения являются:

- наклон подпорной стены в сторону засыпки;
- конфигурация поперечного сечения подпорной стены с переменным размером по высоте;
- конфигурация подпорной стены с ломаным профилем.

Приоритетной задачей при проектировании подпорных стен является определение геометрических параметров сооружения, обеспечивающих дополнительный позитивный эффект. Рациональная конфигурация поперечного сечения подпорных стен позволит изменить характер распределения давления от грунта на боковую поверхность подпорной стены, следовательно, изменится напряженно-деформированное состояние конструкции.

Направлением дальнейших исследований является разработка эффективных конструкций подпорных стен для сурового климата.

Вклад авторов равнозначен. Конфликт интересов отсутствует.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алексеев, А. Г. Определение горизонтального давления грунта на подпорные стены при сезонном промерзании-оттаивании : 25.00.08 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Алексеев Андрей Григорьевич ; ПНИИИС. – Москва, 2006. – 190 с.
2. Фельдман, Г. М. Передвижение влаги в талых и промерзающих грунтах Г. М. Фельдман. – Новосибирск : Наука, 1988. – 257 с.
3. Абжалимов, Р. Ш. Закономерности взаимодействия пучинистого грунтового основания с фундаментами малоэтажных зданий и подземными сооружениями и методы их расчета : 05.23.02 : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Р. Ш. Абжалимов ; Московский государственный университет путей сообщения. – Москва, 2011. – 47 с.
4. Голли, О. Р. Интегральные закономерности морозного пучения грунтов и их использование при решении инженерных задач в строительстве : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Голли О. Р. ; ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – Санкт-Петербург, 2000. – 45 с.
5. Невзоров, А. Л. Фундаменты на сезоннопромерзающих грунтах / А. Л. Невзоров. – Москва : АСВ, 2000. – 152 с.



6. Орлов, В. О. Пучение промерзающих грунтов и его влияние на фундаменты сооружений / В. О. Орлов, Ю. Д. Дубнов, Н. Д. Меренков. – Ленинград : Стройиздат ; Ленингр. отд-ние, 1977. – 184 с.
7. 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.
8. 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 : Korean Geosynthetics Society, 2018. – Vol. 3. – P. 2225–2233.
9. 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 580 (2020) 012028. – 2020. – P. 1–8. – DOI 10.1088/1755-1315/580/1/012028.
10. Rui, D. Full-Scale Model Test on Prevention of Frost Heave of L-Type Retaining Wall / D. Rui, H. Deng, D. Nakamura, Y. Yamashita, T. Suzuki, H. Zhao // Cold Regions Science and Technology. – 2016. – Vol. 132. – P. 89–104.
11. Чмых, Н. В. Снижение сил морозного пучения на поверхности подпорных стен: рациональные конструкции / Н. В. Чмых, О. В. Третьякова // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – № 4 (61). – С. 156–164. – DOI 10.54734/20722958_2024_4_156.
12. Патент на полезную модель № 85502 U1 Российская Федерация, МПК E02D 29/02. Подпорная стенка : № 2009104484/22 : заявл. 10.02.2009 : опубл. 10.08.2009 / Н. Я. Цимбельман, Л. З. Эстрин ; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Дальневосточный государственный технический университет (ДВПИ им. В. В. Куйбышева).
13. Changjian, T. Horizontal Frost Heave Thrust Action Buttress Constructions / T. Changjian, S. Zongyan // Engineering Geology. – 1981. – Vol. 18. – P. 259–268.
14. Feng, G. An Analysis of Dynamics of Retaining Wall Supported Embankments: Towards More Sustainable Railway Designs / G. Feng, Q. Luo, P. Lyu, D. P. Connolly, T. Wang // Sustainability. – 2023. – Vol. 15. – № 7984. – P. 1–24. – DOI 10.3390/su15107984.
15. Lyu, P. Serviceability of railway slab track foundations with retaining walls under train loading / P. Lyu, Q. Luo, T. Wang, D. P. Connolly, Q. Ye // International Journal of Rail Transportation. – 2023. – № 13 (1). – P. 23–48. – DOI 10.1080/23248378.2024.2326514.
16. Клейн, Г. К. Расчет подпорных стен / Г. К. Клейн. – Москва : Высшая школа, 1964. – 196 с.
17. Российский, В. А. Сборные железобетонные подпорные стенки / В. А. Российский. – Киев : Госстройиздат УССР, 1961. – 159 с.
18. Полурадиальная конструкция подпорной стены железных дорог для оптимального распределения горного давления / Т. Б. Иманалиев, К. Н. Аскар, З. А. Осмоналиева, Б. М. Тургумбаева // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н.Исанова. – 2013. – № 2. – С. 38–48.
19. Greco, V. R. Analytical earth thrust on walls with bilinear backface / V. R. Greco // Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering. – 2007. – Vol. 160. – № 1. – P. 23–29.
20. Kolathayar, S. Seismic active earth pressure on walls with bilinear backface using pseudo-dynamic approach / S. Kolathayar, P. Ghosh // Computers and Geotechnics. – 2009. – Vol. 36. – P. 1229–1236.
21. Santhoshkumar, G. Seismic stability of a broken-back retaining wall using adaptive collapse mechanism / G. Santhoshkumar, P. Ghosh // International Journal of Geomechanics. – 2020. – Vol. 20. – № 9. – P. 1–15.



22. Krishnan, K. Probabilistic seismic passive resistance of hunchback retaining wall considering spatial variability / K. Krishnan, D. Chakraborty // Computers and Geotechnics. – 2023. – Vol. 154. – P. 1–16. – DOI 10.1016/j.compgeo.2022.105154.

23. Соколовский, В. В. Статика сыпучей среды / В. В. Соколовский. – Москва : Наука, 1990. – 272 с.

24. Kalmykov, O. Search for Rational Contour of Back Surface of Retaining Wall / O. Kalmykov, R. Khalife, A. Grabowski // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2077. – № 1. – P. 1–6. – DOI 10.1063/1.5091885.

25. Патент № 2041318 С1 Российская Федерация, МПК E02D 29/02. Подпорная стенка : № 5039435/33 : заявл. 22.04.1992 : опубл. 09.08.1995 / Ю. П. Кожин.

CHMYKH Nikita Vyacheslavovich, senior teacher of the chair of civil engineering and material science, senior teacher of the chair of roads and bridges, postgraduate student; TRETYAKOVA Olga Viktorovna, candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the chair of civil engineering and material science

STRUCTURAL FEATURES OF RETAINING WALLS SUBJECTED TO ADDITIONAL HORIZONTAL LOAD FROM FROST HEAVING FORCES

Perm National Research Polytechnic University.

29, Komsomolsky Prospekt, Perm, Russia, 614990.

Tel.: (342) 2-391-341; e-mail: Chmykh.n.v@yandex.ru; olga_wsw@mail.ru

Key words: retaining walls, frost heave, horizontal loads, construction stability.

The article is devoted to the study of retaining wall configurations subjected to static horizontal loads and seasonal phenomena such as frost heaving. The paper considers constructive solutions, including walls with reverse slope, variable cross-section, and broken profile, which contribute to load redistribution and deformation reduction. Particular attention is paid to analyzing the influence of retaining wall configuration on the distribution of soil pressure. Based on a review of domestic and foreign studies, effective characteristic design features of retaining walls subjected to additional horizontal load have been identified.

REFERENCES

1. Alekseev A. G. Opredelenie gorizontalnogo davleniya grunta na podpornye steny pri sezonnom promerzanii-ottaivanii [Determination of horizontal soil pressure on retaining walls during seasonal freezing-thawing]: 25.00.08: diss. ... kand. tekhn. nauk; PNIIS. Moscow, 2006, 190 p.

2. Feldman G. M. Peredvizhenie vlagi v talykh i promerzayushchikh gruntakh [Movement of moisture in thawed and freezing soils]. Novosibirsk, Nauka, 1988, 257 p.

3. Abdzhalimov R. Sh. Zakonomernosti vzaimodeystviya puchinistogo gruntovogo osnovaniya s fundamentami maloetazhnykh zdaniy i podzemnymi sooruzheniyami i metody ikh rascheta [Patterns of interaction of a heaving soil base with foundations of low-rise buildings and underground structures and methods for their calculation]: 05.23.02: avtoref. diss. ... dok. tekhn. nauk; Moskovskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya. Moscow, 2011, 47 p.

4. Golli O. R. Integralnye zakonomernosti moroznogo pucheniya gruntov i ikh ispolzovanie pri reshenii inzhenernykh zadach v stroitelstve [Integral patterns of soil frost heave and their use in solving engineering problems in construction]: avtoref. diss. ... dok. tekhn. nauk; VNIIG im. B. E. Vedeneva. Saint Petersburg, 2000, 45 p.



5. Nevzorov A. L. Fundamenty na sezonno-promerzayushchikh gruntakh [Foundations on seasonally freezing soils]. Moscow, ASV, 2000, 152 p.
6. Orlov V. O., Dubnov Yu. D., Merenkov N. D. Puchenie promerzayushchikh gruntov i ego vliyanie na fundamenty sooruzheniy [Heaving of freezing soils and its influence on building foundations]. Leningrad, Stroyizdat, Leningradskoe otделение, 1977, 184 p.
7. Metelkin S. V., Paramonov V. N. Moroznoe puchenie i ego vliyanie na raspornuyu sistemu ograzhdayushchikh konstruktsiy glubokikh kotlovanov [Frost heave and its influence on the bracing system of enclosing structures of deep excavations]. Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya [Proceedings of Petersburg University of Transport]. Saint Petersburg, 2022, Vol. 19, No. 1, P. 133–142. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-19-1-133-142.
8. Sato A., Yamanashi T., Suzuki T., Tatta N., Kubo T. Long-Term Measurement of Frost-Heave Deformation in Geotextile-Reinforced Soil Walls. In: 11th International Conference on Geosynthetics 2018, ICG 2018. Seoul: Korean Geosynthetics Society, 2018, Vol. 3, P. 2225–2233.
9. 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, 2020, Vol. 580, 012028, P. 1–8. DOI: 10.1088/1755-1315/580/1/012028.
10. Rui D., Deng H., Nakamura D., Yamashita Y., 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, P. 89–104.
11. Chmykh N. V., Tretyakova O. V. Snizhenie sil moroznogo pucheniya na poverkhnosti podpornykh sten: ratsional'nye konstruktsii [Reduction of frost heave forces on the surface of retaining walls: rational designs]. Regional'naya arkhitektura i stroitelstvo [Regional Architecture and Construction]. Volgograd, 2024, № 4 (61), P. 156–164. DOI: 10.54734/20722958_2024_4_156.
12. Patent na poleznuyu model № 85502 U1 Rossiyskaya Federatsiya, MPK E02D 29/02. Podpornaya stenka [Utility model patent No. 85502 U1 Russian Federation, IPC E02D 29/02. Retaining wall]: № 2009104484/22: zayavl. 10.02.2009: opubl. 10.08.2009 / N. Ya. Tsimbelman, L. Z. Estrin; zayavitel Gosudarstvennoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego professionalnogo obrazovaniya Da'nevostochnyy gosudarstvenny tekhnicheskii universitet (DVPI im. V. V. Kuybysheva).
13. Changjian T., Zongyan S. Horizontal Frost Heave Thrust Action Buttress Constructions. Engineering Geology, 1981, Vol. 18, P. 259–268.
14. Feng G., Luo Q., Lyu P., Connolly D. P., Wang T. An Analysis of Dynamics of Retaining Wall Supported Embankments: Towards More Sustainable Railway Designs. Sustainability, 2023, Vol. 15, No. 7984, P. 1–24. DOI: 10.3390/su15107984.
15. Lyu P., Luo Q., Wang T., Connolly D. P., Ye Q. Serviceability of railway slab track foundations with retaining walls under train loading. International Journal of Rail Transportation, 2023, No. 13 (1), P. 23–48. DOI: 10.1080/23248378.2024.2326514.
16. Kleyn G. K. Raschet podpornykh sten [Calculation of retaining walls]. Moscow, Vysshaya shkola, 1964, 196 p.
17. Rossiyskiy V. A. Sbornye zhelezobetonnye podpornye stenki [Precast reinforced concrete retaining walls]. Kyiv, Gosstroyizdat USSR, 1961, 159 p.
18. Imanaliev T. B., Askar K. N., Osmonalieva Z. A., Turgumbaeva B. M. Poluradialnaya konstruktsiya podpornoy steny zheleznykh dorog dlya optimalnogo raspredeleniya gornogo davleniya [Semi-radial design of a railway retaining wall for optimal distribution of mountain pressure]. Vestnik Kyrgyzskogo gosudarstvennogo universiteta stroitelstva, transporta i arkhitektury im. N. Isanova [Bulletin of the Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture named after N. Isanov]. Bishkek, 2013, № 2, P. 38–48.
19. Greco V. R. Analytical earth thrust on walls with bilinear backface. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering, 2007, Vol. 160, No. 1, P. 23–29.



20. Kolathayar S., Ghosh P. Seismic active earth pressure on walls with bilinear backface using pseudo-dynamic approach. *Computers and Geotechnics*, 2009, Vol. 36, P. 1229–1236.
21. Santhoshkumar G., Ghosh P. Seismic stability of a broken-back retaining wall using adaptive collapse mechanism. *International Journal of Geomechanics*, 2020, Vol. 20, No. 9, P. 1–15.
22. Krishnan K., Chakraborty D. Probabilistic seismic passive resistance of hunchback retaining wall considering spatial variability. *Computers and Geotechnics*, 2023, Vol. 154, P. 1–16. DOI: 10.1016/j.compgeo.2022.105154.
23. Sokolovskiy V. V. *Statika sypuchey sredy* [Statics of a granular medium]. Moscow, Nauka, 1990, 272 p.
24. Kalmykov O., Khalife R., Grabowski A. Search for Rational Contour of Back Surface of Retaining Wall. *AIP Conference Proceedings*, 2019, Vol. 2077, No. 1, P. 1–6. DOI: 10.1063/1.5091885.
25. Patent № 2041318 C1 Rossiyskaya Federatsiya, MPK E02D 29/02. Podpornaya stenka [Retaining wall]: № 5039435/33: zayavl. 22.04.1992: opubl. 09.08.1995 / Yu. P. Kozhin.

© Н. В. Чмых, О. В. Третьякова, 2026

Получено: 12.03.2026 г.