

Научная статья
УДК 69.04
<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-2/3-11>

Расчёт подпорной стенки с учётом отрыва от основания

Михаил Владимирович Долгачёв, Александр Николаевич Попов ✉

Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Российская Федерация,
✉ sanyapov@mail.ru

Аннотация. В работе рассматривается гравитационная уголкового типа консольная подпорная стенка с вертикальной лицевой и наклонной тыльной гранями. Производится расчёт на сдвиг и навал подпорной стенки с учётом одностороннего взаимодействия подпорной стенки и основания. Выбирается оптимальный параметр длины основания консольной подпорной стенки со стороны активного давления грунта для обеспечения устойчивости конструкции. Определяется момент превращения конструкции в геометрически изменяемую систему. Для численного моделирования используется метод конечных элементов, задача одностороннего контакта с трением ставится в виде линейной задачи дополненности. Для основания подпорной стенки получено распределение контактных усилий взаимодействия и приведены зависимости устойчивости стенки от длины её основания.

Ключевые слова: метод конечных элементов, подпорная стенка, линейная задача дополненности, односторонний контакт, контакт с трением

Для цитирования: Долгачёв М.В., Попов А.Н. Расчёт подпорной стенки с учётом отрыва от основания // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2024. № 2(59). С. 3–11.

Original article

Analysis of a retaining wall considering separation off the base

Mikhail V. Dolgachev, Aleksandr N. Popov ✉

Pacific National University, Khabarovsk, Russian Federation,
✉ sanyapov@mail.ru

Abstract. This paper investigates a gravity cantilever retaining wall of an angular type, featuring a vertical front face and an inclined rear face. The analysis focuses on the shear and overturning stability of the retaining wall, taking into account the unilateral interaction between the wall and its foundation. The study aims to determine the optimal length of the cantilever base on the active soil pressure side to ensure the stability of the structure. Additionally, the moment at which the structure begins to displace as a rigid body is identified. The finite element method (FEM) is employed for numerical modeling, and the unilateral contact problem with friction is formulated as a linear complementarity problem (LCP). The distribution of contact forces along the base of the retaining wall is obtained, and the dependencies of the wall's stability on its base length are presented.

Keywords: finite element method, retaining wall, linear complementarity problem, unilateral contact, frictional contact

For citation: Dolgachev M.V., Popov A.N. Analysis of a retaining wall considering separation off the base. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2024, no. 2(59), pp. 3–11. (In Russ.).

Введение

Подпорная стенка – сооружение, предназначенное для удержания грунта от оползания и обеспечения стабильности территории. В контексте строительной механики подпорные

стенки играют ключевую роль в предотвращении деформаций откосов и сохранении целостности земляных масс. С точки зрения инженерной функциональности подпорные стенки могут быть классифицированы как укрепительные и декоративные. Укрепительные стенки предназначены для поддержания стабильности грунтовых масс и предотвращения оползней, в то время как декоративные стенки служат в основном эстетическим целям. Укрепительные подпорные стенки используются в строительстве для создания террасированных склонов и увеличения полезной площади для размещения объектов. Они обеспечивают эффективное использование неровного рельефа и предотвращают эрозию почвы, что важно для жилищного строительства и аграрной деятельности.

При расчёте подпорных стенок часто рассматриваются задачи выбора оптимальных параметров для минимизации стоимости или времени возведения [1–6], используя как аналитические [1–3, 6], так и численные [4, 5] подходы. Требования и рекомендации по расчёту подпорных сооружений изложены в нормативном документе СП 381.1325800.2018 «Сооружения подпорные».

При расчёте подпорных стенок, как правило, анализируют учёт совместной работы с грунтом [1], указывают на несовершенство расчётов в нормативных документах и приводят рекомендации по их улучшению [3], решают задачу поиска оптимальных параметров для повышения устойчивости и прочности конструкции [4–6]. Работы зарубежных авторов чаще всего сосредоточены на численном моделировании и поиске оптимальных параметров для подпорной стенки [4, 5].

Предлагается определить оптимальный размер основания подпорной стенки с учётом её одностороннего взаимодействия с грунтовым основанием. Исходя из этого определены цели и задачи.

Цели:

- протестировать алгоритм расчёта контактной задачи на примере подпорной стенки при определении её устойчивости;
- предложить рекомендации по расчёту подобных подпорных стенок.

Задачи:

- создать численную модель подпорной стенки и взаимодействующего с ней грунта с учетом одностороннего взаимодействия;
- основать и выбрать метод расчета, подходящий для анализа устойчивости подпорной стенки с учетом заданных условий;
- разработать и реализовать способ моделирования одностороннего взаимодействия стенки с грунтом в рамках выбранного метода расчета;
- провести серию расчетов с изменением длины основания подпорной стенки. Построить графики зависимости ключевых параметров устойчивости от длины основания;
- на основе результатов исследования сформулировать выводы о влиянии длины основания на устойчивость подпорной стенки. Разработать практические рекомендации по расчету и проектированию подобных конструкций.

Методы

Проблема поиска оптимальных параметров конструкции весьма многогранна. Предлагается рассмотреть задачу поиска оптимальной длины основания угловой подпорной стенки (рис. 1). Все размеры на расчетной схеме указаны в метрах, величины поверхностных нагрузок – в МПа. Учитывались: q_x и q_y – горизонтальное и вертикальное давление засыпки на боковые поверхности стенки; q_{gr} – вертикальная пригрузка весом грунта засыпки; q_n и q_t – нагрузка по верхнему торцу фрагмента, передаваемая отсеченной частью конструкции; собственный вес фрагмента.

Модули упругости бетона и скального основания равны соответственно $E_b = 26500$ МПа, $E_o = 20000$ МПа; коэффициенты Пуассона – $\nu_b = 0.15$, $\nu_o = 0.2$; объемный вес

бетона – 24 кН/м³, коэффициент трения $f = 0.5$; напряженное состояние принималось плоским деформированным. Объемный вес скального основания в число нагрузок не входил.

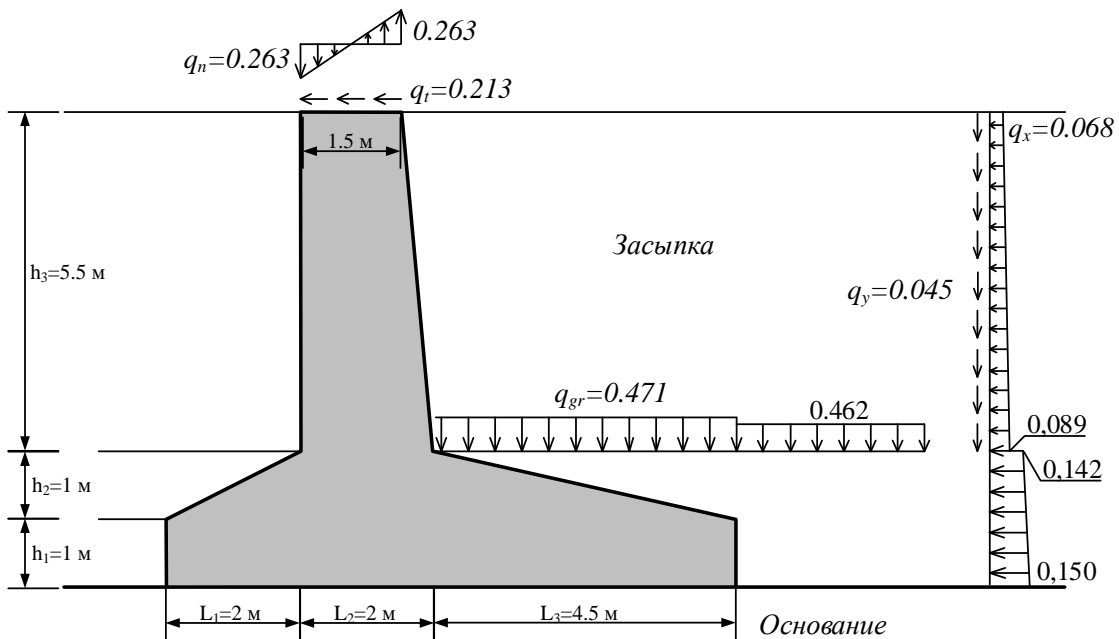


Рис. 1. Расчётная схема подпорной стенки

Fig. 1. Design scheme of the retaining wall

В качестве переменного параметра принимается длина L_3 . В силу большой протяжённости подпорной стенки рассматривается задача плоской деформации (задача с нулевыми деформациями из плоскости). Подпорная стенка и грунт-основание моделируются с помощью метода конечных элементов с использованием четырёхузлового элемента плоской задачи теории упругости (рис. 2). Активное давление грунта (от удерживаемой насыпи) моделируется нагрузкой. Размеры грунта-основания выбирались таким образом, чтобы условия описания не влияли на результаты решения в области контакта подпорной стенки с грунтом. Для грунта-основания узлы боковых граней закреплены от смещения по горизонтали, для нижней грани узлы закреплены от смещения по горизонтали и вертикали. В силу невозможности грунта работать на растяжение учитывается одностороннее взаимодействие подпорной стенки и грунта-основания. Задача одностороннего взаимодействия ставится в виде линейной задачи дополнителности (ЛЗД) [7]. Таким образом можно учесть возможность отрыва или проскальзывания подпорной стенки по грунту-основанию.

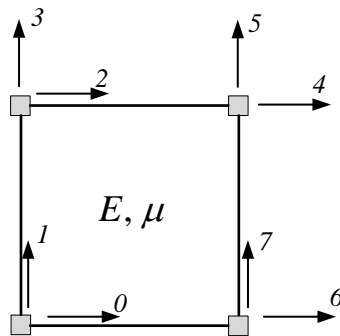


Рис. 2. Четырёхузловой элемент плоской задачи теории упругости

Fig. 2 Four-node plane element of the theory of elasticity

Для решения задачи разработана программа на языке Python и написан генератор сетки конечных элементов (КЭ) (рис. 3 б). Область задачи разбивалась на макроэлементы (MEi).

Таким образом автоматизировался процесс создания согласованной сетки КЭ в системе. На рис. 3а представлена сгенерированная сетка КЭ.

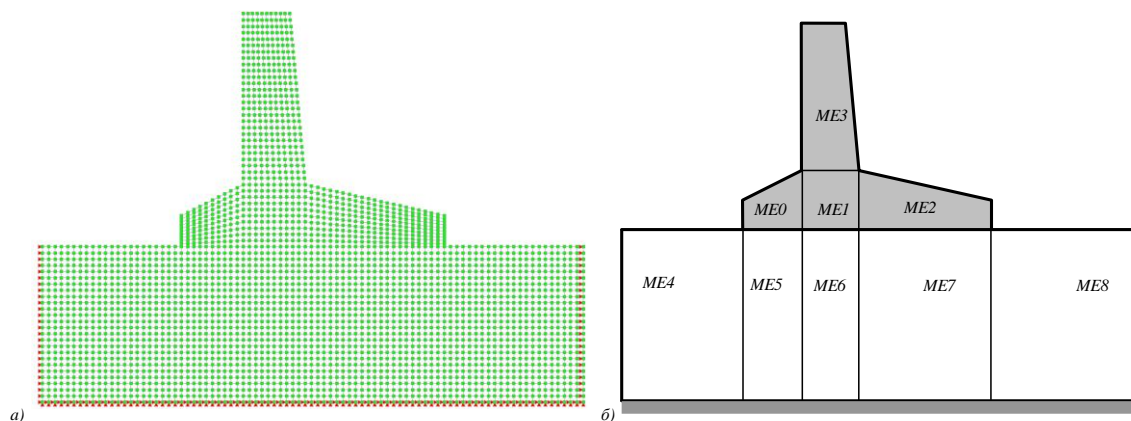


Рис. 3. Макроэлементы и сетка КЭ

Fig. 3. Macroelements and FE grid

Согласованная сетка КЭ необходима для простоты постановки задачи в виде ЛЗД, представляющей систему уравнений и неравенств:

$$\mathbf{x} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{z} + \mathbf{R}_F;$$

$$\mathbf{z} \geq 0; \mathbf{x} \geq 0; \mathbf{z}^T \cdot \mathbf{x} = 0,$$

где \mathbf{R} – контактная матрица жёсткости;
 \mathbf{R}_F – контактный грузовой вектор;
 \mathbf{z} – вектор взаимных перемещений точек контактных пар;
 \mathbf{x} – вектор усилий взаимодействия точек контактных пар.

Решением ЛЗД является нахождение пары неотрицательных векторов. После получения взаимных перемещений и усилий взаимодействия можно восстановить напряжённо-деформированное состояние системы. Особенность данной постановки контактной задачи с трением такова, что она позволяет решать задачи, даже если одно из тел способно перемещаться без деформирования (не имеет собственных опор), в данном случае это объект подпорной стенки. В качестве закона трения используется закон трения Кулона. Таким образом, для подпорной стенки возможны линейное и угловое смещения. При линейном смещении подпорная стенка соскальзывает по основанию и перемещения становятся неопределимыми (силы трения предельны по всей области контакта). При угловом смещении подпорная стенка теряет устойчивое положение и опрокидывается (силы трения допредельны в области контакта).

Для изучения поведения конструкции вводится безразмерный параметр $\varepsilon = \frac{h_1 + h_2 + h_3}{L_2 + L_3} = \frac{h}{L}$ как отношение высоты подпорной стенки к её длине (см. рис. 1). И

рассчитывается запас горизонтальной F_h и вертикальной нагрузки F_v , который способна выдержать подпорная стенка, не достигая состояния предельного равновесия системы (конструкция не способна сопротивляться внешним воздействиям). Для расчёта вертикальной составляющей используется сумма всех компонент вектора нормальных усилий взаимодействия для правой части подпорной стенки $F_v = \sum x_n^r$. Для расчёта запаса горизонтальной нагрузки берётся разница векторов предельных сил трения и касательных усилий взаимодействия и считается их сумма $F_h = \sum (f \cdot x_n - x_t)$. Узлы правой части подпорной стенки берутся в зоне $L_2 + L_3$. Таким образом, получаем два параметра: F_v – отвечающий за опрокидывание подпорной стенки, если $F_v = 0$; F_h – отвечающий за скольжение подпорной стенки по основанию, если $F_h = 0$.

Результаты

Параметр L_3 изменяется в диапазоне от 8 до 1.5 м. На рис. 4 представлены случаи для длины L_3 , равной 7, 5 и 3 м.

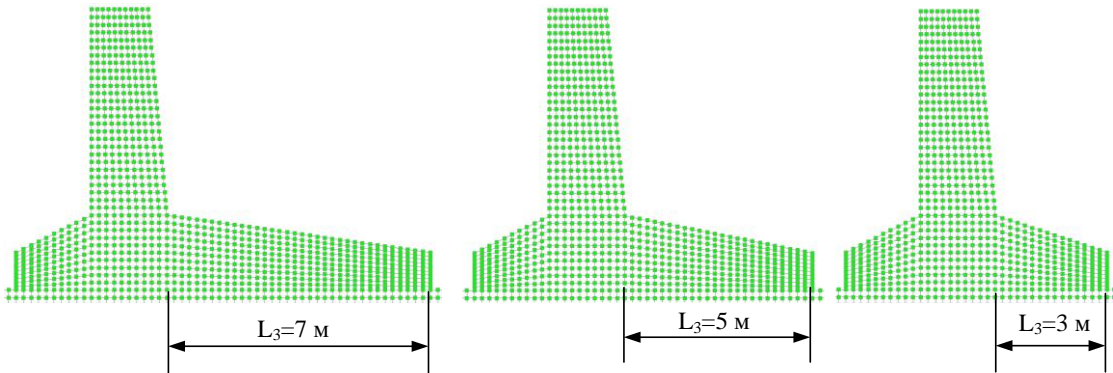


Рис. 4. Сетка КЭ для схем подпорной стенки

Fig. 4. FE grid for retaining wall scheme

Результатом решения ЛЗД являются контактные усилия взаимодействия и взаимные перемещения по нормали x_n, z_n и по касательной x_t, z_t к зоне контакта (рис. 5).

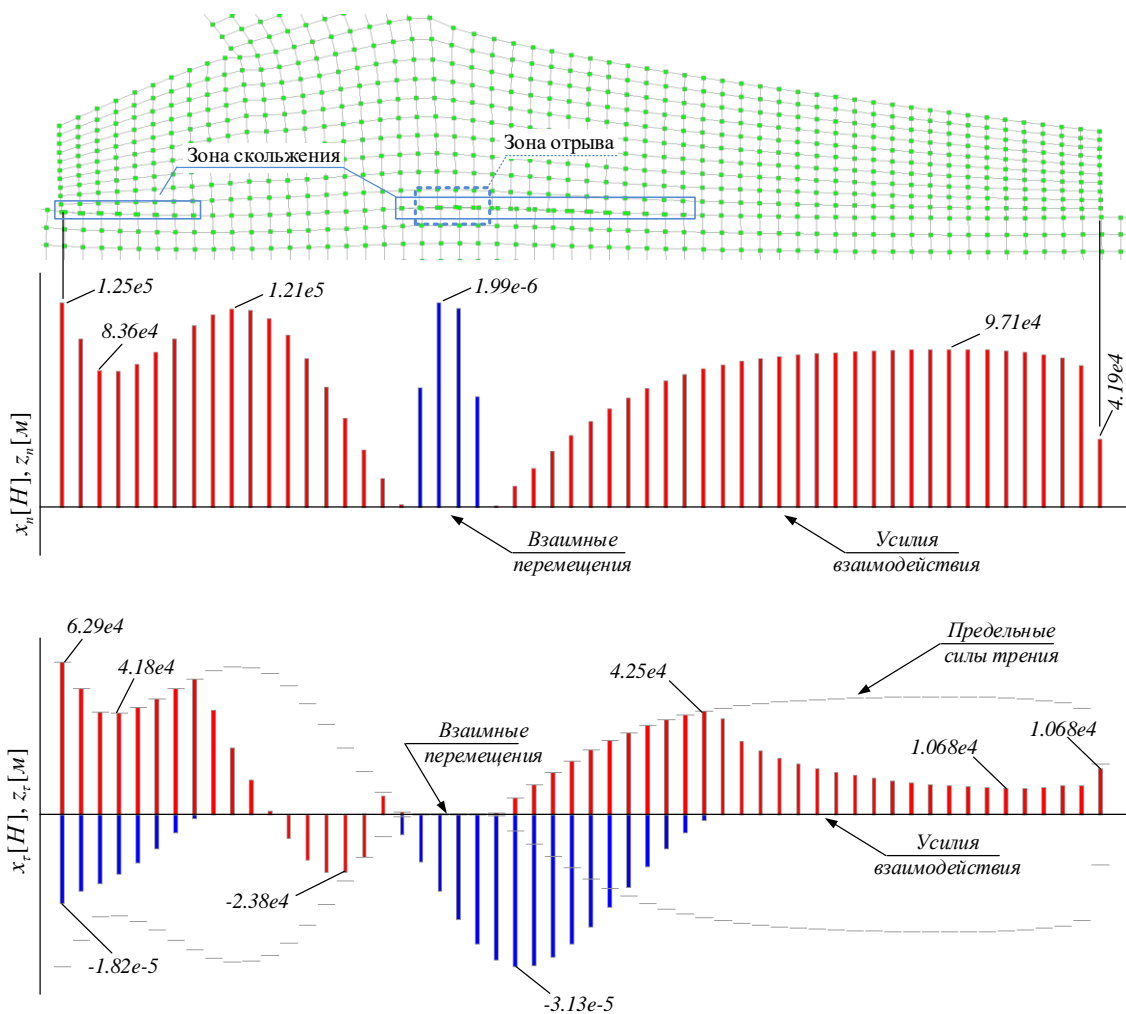


Рис. 5. Результат решения ЛЗД для $L_3=7$ м.

Fig. 5. Calculation result LCP for $L_3=7$ м

Зависимость запаса внешней нагрузки F_v, F_h [кН] от параметра отношения высоты к длине ε показана на рис. 6. Каждый шаг соответствует расчёту при изменении длины L_3 на 1 м.

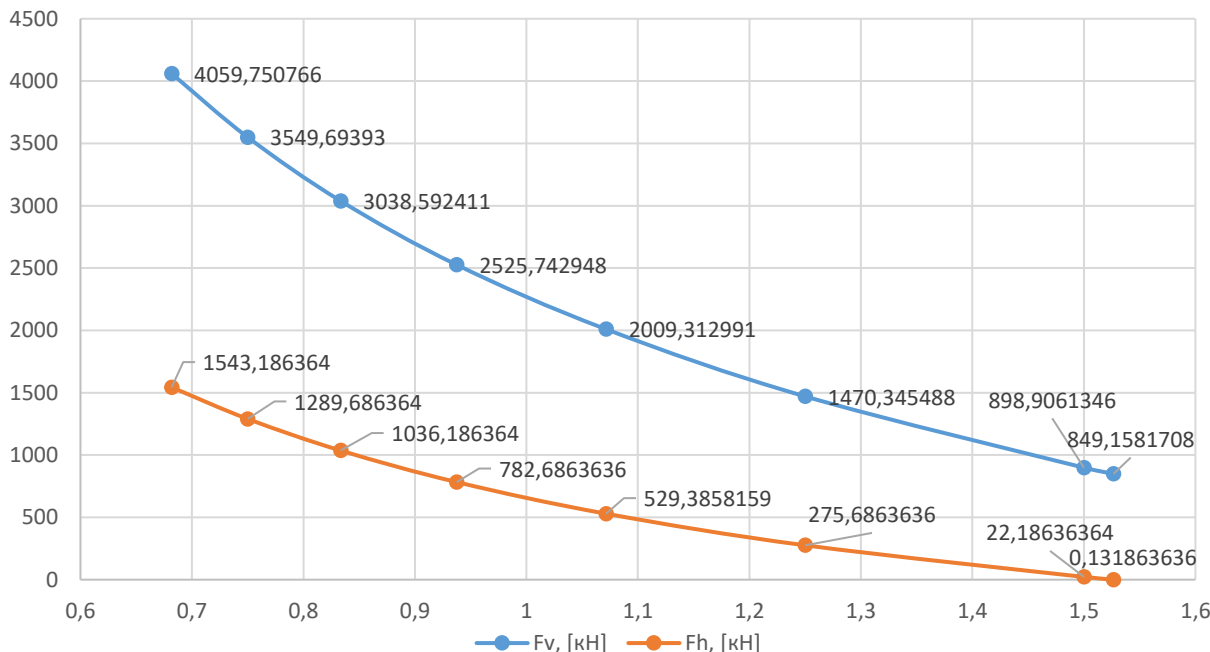


Рис. 6. Зависимость F_v и F_h от ε при $f=0.5$

Fig. 6. Dependence F_v and F_h of ε at $f=0.5$

При $\varepsilon > 1.5265621$ или $L_3 < 2.913$ м происходит проскальзывание подпорной стенки по основанию. При этом сохраняется запас от опрокидывания подпорной стенки $F_v = 849.158$ кН.

В зависимости от свойств грунта коэффициент трения между подпорной стенкой и грунтом может меняться. Рассматривается такое же исследование, но при коэффициенте трения в зоне контакта $f = 0.9$ (рис. 7).

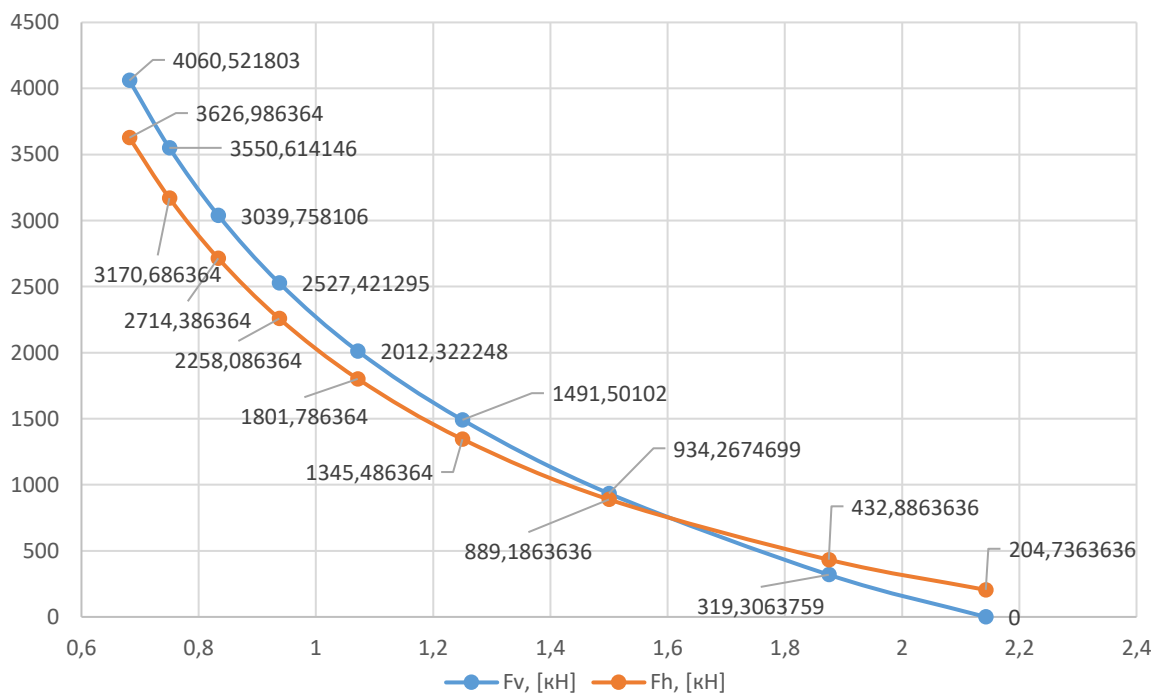


Рис. 7. Зависимость F_v и F_h от ε при $f=0.9$

Fig. 7. Dependence F_v и F_h of ε at $f=0.9$

Для данной постановки в крайнем случае (при $\varepsilon = 2.1428571$ или $L_3=1.5$) произошёл отрыв правой части подпорной стенки, но она всё ещё находится в равновесии. Деформированная схема (масштаб 1000:1) при $f=0.9$ и $L_3=1.5$ м показана на рис. 8.

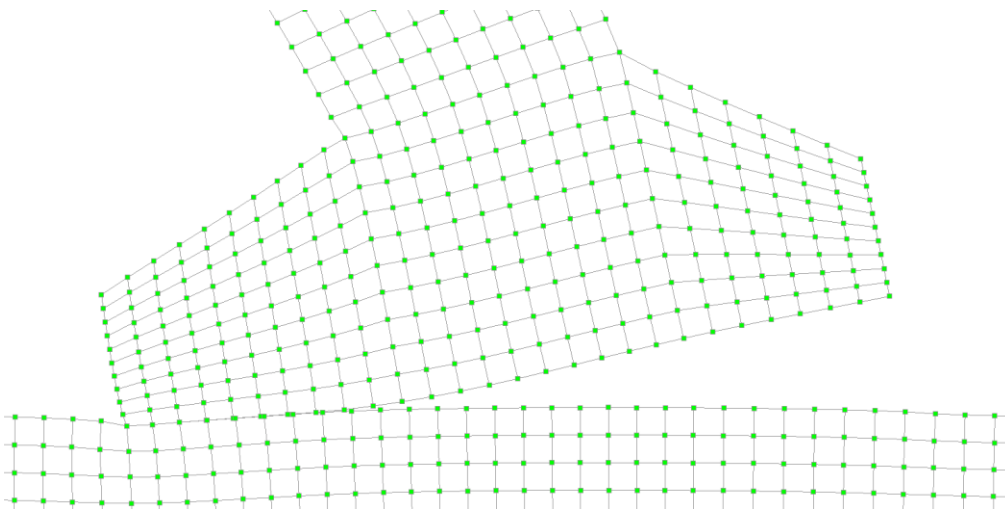


Рис. 8. Деформированная схема перед моментом опрокидывания M1000:1

Fig. 8. Deformed scheme before overturning M1000:1.

Во избежание перерасхода материалов необходимо проводить предварительные расчёты для выбора оптимальных параметров подпорной стенки. Важно учитывать возможность потери устойчивости, которая может привести к смещению или полному опрокидыванию подпорной стенки, что равносильно её разрушению.

Обсуждение результатов

Произведена серия расчётов подпорной стенки с рядом упрощений.

1. Отбрасывается часть грунта, формирующая активное давление, и заменяется усилиями.
2. Пассивное давление грунта не учитывалось.
3. Собственный вес грунта-основания не учитывался.

Малая фокусировка на грунте и его характеристиках позволила получить простую схему, где основной для изучения темой является взаимодействие подпорной стенки с достаточно жёстким деформируемым основанием.

В ходе проведения численных экспериментов выяснилось, что для рассмотренного формата подпорной стенки характерно проскальзывание по грунту при коэффициенте трения $f=0.5$ между грунтом и сооружением. При рассмотрении задачи с коэффициентом трения, равным $f=0.9$, наиболее вероятно опрокидывание подпорной стенки. В обоих случаях с уменьшением величины основания подпорной стенки L_3 система доведена до критической отметки, при которой происходит потеря устойчивости (неспособность подпорной стенки выдерживать внешнее воздействие).

Интересно отметить, что отрыв поверхности подпорной стенки от грунта при уменьшении длины L_3 происходит сначала в середине зоны контакта. В дальнейшем в зависимости от коэффициента трения отрыв увеличивается вправо до полной потери устойчивости.

Заключение

В результате выполнения поставленных задач были получены следующие результаты:

- создана модель подпорной стенки и грунта, позволяющая исследовать их взаимодействие с учетом односторонних связей;
- выбран метод конечных элементов как наиболее подходящий для анализа напряженно-деформированного состояния системы и оценки устойчивости конструкции;

- реализован способ моделирования одностороннего взаимодействия стенки и грунта с помощью постановки задачи в виде ЛЗД, учитывающей возможность отрыва основания от грунта;
- проведена серия расчетов с варьированием длины основания подпорной стенки, построены графики зависимости ключевых параметров от длины основания;
- установлено, что длина основания оказывает существенное влияние на устойчивость подпорной стенки. С увеличением длины основания, коэффициент запаса устойчивости возрастает.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что учет одностороннего взаимодействия является важным аспектом при расчете подпорных стенок, так как позволяет более точно оценить возможность опрокидывания конструкции. Полученные зависимости на основе проведенного исследования могут быть использованы инженерами-проектировщиками для оптимизации параметров подпорных стенок и обеспечения их надежной и безопасной эксплуатации.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

М.В. Долгачев: разработка темы исследования, поиск актуальной литературы и разработка модели взаимодействия. Постановка задачи. А.Н. Попов: написание программы для расчётов, реализация алгоритмов, оформление и тестирование.

Mikhail V. Dolgachev: development of the research topic, search for relevant literature and development of an interaction model. Formulation of the problem.

Aleksandr N. Popov: writing a program for calculations, implementing algorithms, design and testing.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | CONFLICT OF INTEREST

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кожушко В.П., Краснов С.Н. Анализ работы уголковой подпорной стенки при взаимодействии её с грунтом // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2020. № 90. С. 134–143. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2020.90.0.134>
2. Леденев В.В., Однолько В.Г. Расчет и конструирование специальных инженерных сооружений. Тамбов: Издательство ТГТУ, 2007. 128 с.
3. Семенюк С.Д., Котов Ю.Н. Железобетонные подпорные стены // Вестник Белорусско-Российского университета. 2018. № 4(61). С. 86–101. URL: <http://e.biblio.bru.by/handle/1212121212/7491>
4. Kaveh A., Biabani Hamedani K., Bakhshpoori T. Optimal Design of Reinforced Concrete Cantilever Retaining Walls Utilizing Eleven Meta-Heuristic Algorithms: A Comparative Study // Periodica Polytechnica Civil Engineering. 2020. Vol. 64, № 1. P. 156–168. <https://doi.org/10.3311/PPci.15217>
5. Jiwankar H., Mahule N., Jichkar R., Dahiwal V., Dabhekar K., Khedekar I., Agrawa R. Comparative Analysis of Cantilever Retaining Wall and Retaining Wall with Relieving Platform // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 822. Art. 012027. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/822/1/012027>
6. Kaveh A., Akbari H., Hosseini S.M. Plasma Generation Optimization for Optimal Design of Reinforced Concrete Cantilever Retaining Wall Structures // Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering. 2022. Vol. 46. P. 1177–1200. <https://doi.org/10.1007/s40996-020-00566-8>
7. Popov A.N., Lovtsov A.D. Frictional Contact Problem in Building Constructions Analysis // Magazine of Civil Engineering. 2020. Vol. 100, № 8. Art. 10001. <https://doi.org/10.18720/MCE.100.1>

REFERENCES

1. Kozhushko V.P., Krasnov S.N. Analyzing the Function of Counterfort Wall When It Interacts with the Ground. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*, 2020, no. 90, pp. 134–143. (In Russ.). <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2020.90.0.134>

2. Ledenev V.V, Odnolko V.G. Design and Construction of Special Engineering Structures. TGTU Publ., 2007. 128 p. (In Russ.).
3. Semeniuk S.D., Kotov Y.N. Reinforced Concrete Retaining Walls. *Vestnik Belorussko-Rossijskogo universiteta*, 2018, no. 4(61), pp. 86–101. (In Russ.). URL: <http://e.biblio.bru.by/handle/1212121212/7491>
4. Kaveh A., Biabani Hamedani K., Bakhshpoori T. Optimal Design of Reinforced Concrete Cantilever Retaining Walls Utilizing Eleven Meta-Heuristic Algorithms: A Comparative Study. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 2020, vol. 64, no. 1, pp. 156–168. <https://doi.org/10.3311/PPci.15217>
5. Jiwankar H., Mahule N., Jichkar R., Dahiwale V., Dabhekar K., Khedikar I., Agrawa R. Comparative Analysis of Cantilever Retaining Wall and Retaining Wall with Relieving Platform. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 822, art. 012027. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/822/1/012027>
6. Kaveh A., Akbari H., Hosseini S.M. Plasma Generation Optimization for Optimal Design of Reinforced Concrete Cantilever Retaining Wall Structures. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 2022, vol. 46, pp. 1177–1200. <https://doi.org/10.1007/s40996-020-00566-8>
7. Popov A.N., Lovtsov A.D. Frictional Contact Problem in Building Constructions Analysis. *Magazine of Civil Engineering*, 2020, vol. 100, no. 8, art. 10001. <https://doi.org/10.18720/MCE.100.1>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Долгачев Михаил Владимирович – кандидат технических наук, доцент Высшей школы промышленного и гражданского строительства, Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Российская Федерация, bearsgod@pnu.edu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1520-800X>

Mikhail V. Dolgachev, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of Higher School of Industrial and Civil Engineering, Pacific National University, Khabarovsk, Russian Federation, bearsgod@pnu.edu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1520-800X>

Попов Александр Николаевич – старший преподаватель Высшей школы промышленного и гражданского строительства, Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Российская Федерация, pan@pnu.edu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6762-5476>

Aleksandr N. Popov, Senior Lecturer of Higher School of Industrial and Civil Engineering, Pacific National University, Khabarovsk, Russian Federation, pan@pnu.edu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6762-5476>

Статья поступила в редакцию / Received: 03.05.2024.

Доработана после рецензирования / Revised: 31.05.2024.

Принята к публикации / Accepted: 10.06.2024.