

УДК 624.131.53

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-103-117](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-103-117)

EDN: TENFGK

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МОДЕЛИ ГИБКОЙ ПОДПОРНОЙ СТЕНКИ И ГРУНТА ЗАСЫПКИ. ЭКСПЕРИМЕНТ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

В.В. БРЫКСИН

Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений (НИИОСП) им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство», Рязанский проспект, д. 59, г. Москва, 109428, Российская Федерация

Аннотация

Введение. В отечественных нормах боковое давление грунта регламентируется определять для стадии, соответствующей образованию поверхности скольжения, что отвечает теории Кулона. При этом предельные величины давления грунта на гибкую стенку не зависят от характера и интенсивности деформаций подпорной конструкции. В связи с этим возникает необходимость совершенствования методов расчета ограждений для учета вышеуказанных факторов.

Цель работы: получение опытных данных для разработки метода расчета активного давления грунта на подпорные конструкции в зависимости от их деформаций.

Материалы и методы. Опытные работы выполнены методом физического моделирования для различных схем моделей гибких подпорных стенок с использованием специализированного лабораторного испытательного стенда. В качестве модельного грунта засыпки применялся песок средней крупности, определение физических характеристик которого производилось в лабораторных условиях в соответствии с ГОСТ 5180-2015.

Результаты. Проведенные исследования позволили получить данные о характере деформаций грунта засыпки в пределах призмы обрушения для различных кинематических условий работы модели подпорной стенки и, соответственно, обосновать применение феноменологической модели наклонных блоков, использованной для разработки метода определения активного давления грунта на ограждающие конструкции.

Выводы. Опытные исследования показали соответствие характера деформирования грунта засыпки и принятых условий работы грунта в рамках разработки инженерного метода определения бокового давления грунта. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы в процессе реализации и верификации предлагаемого метода расчета, который позволит проектировать ограждения котлованов более обосновано и во взаимном соответствии с фактическими эпюрами давления грунта.

Ключевые слова: активное давление грунта, гибкие подпорные стенки, экспериментальный анализ, численное моделирование

Для цитирования: Брыксин В.В. Особенности деформирования модели гибкой подпорной стенки и грунта засыпки. Эксперимент в лабораторных условиях. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;41(2):103-117. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-103-117](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-103-117)

Вклад автора

Автор берет на себя ответственность за все аспекты работы над статьей.

Финансирование

Статья написана в рамках выполнения НИОКР за счет финансирования ФАУ «ФЦС».

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 18.03.2024
Поступила после рецензирования 18.04.2024
Принята к публикации 25.04.2024

EXPERIMENTAL RESEARCH OF A FLEXIBLE RETAINING WALL MODEL IN LABORATORY CONDITIONS

V.V. BRYKSIN

Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Ryazanskiy ave., 59, Moscow, 109428, Russian Federation

Abstract

Introduction. The Russian standards determine the lateral earth pressure at the failure surface stage, which corresponds to the Coulomb's theory. In this case, the limit values of earth pressure on the flexible wall remain independent from the nature and intensity of deformation of the retaining structure. Therefore, computational methods for retaining walls are to be improved considering the above-mentioned factors.

Aim. To obtain experimental data in order to develop a computational method for determination of the active earth pressure on retaining structures depending on their deformations.

Materials and methods. Experimental tests were carried out by physical simulation for various models of flexible retaining walls using a purpose-designed laboratory test bench. Medium sand was used as a model backfill soil; its physical properties were determined under laboratory conditions in accordance with State Standard 5180-2015.

Results. The tests provided data on the character of backfill soil deformations within the wedge of failure for different kinematic conditions of the retaining wall model and, accordingly, justified the application of inclined block phenomenological model, used to develop a computational method for determining the active earth pressure on retaining walls.

Conclusions. Experimental tests indicate the correlation between deformation nature of the backfill soil and accepted conditions of soil operation during the development of engineering method for determining the lateral earth pressure. The obtained experimental data can be used in adoption and verification of the suggested computational method that enables shoring of excavations to be designed more reasonably in mutual conformity with the actual earth pressure diagrams.

Keywords: active earth pressure, flexible retaining walls, experimental analysis, numerical simulation

For citation: Bryksin V.V. Experimental research of a flexible retaining wall model in laboratory conditions. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;41(2):103–117. [In Russian]. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-103-117](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-103-117)

Author contribution statement

The author takes responsibility for all the aspects of the article.

Funding

The article was written as part of the implementation of R&D at the expense of funding from the Federal Center for Regulation, Standardization and Technical Assessment in Construction (FAU "FCC").

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Received 18.03.2024
Revised 18.04.2024
Accepted 25.04.2024

Введение

В настоящее время специальных модельных или натуральных опытных исследований по изучению закономерностей поведения подпорных конструкций проводится относительно немного [1–5]. Вместе с тем отличаются широким охватом исследования, выполняемые численно при помощи математического моделирования, ввиду относительной доступности передовых программных средств по решению самых сложных геотехнических задач, в том числе и по определению бокового давления грунта на подпорные конструкции, что нашло свое отражение в подавляющем количестве публикаций [6–9].

В то же время следует отметить, что работа в современных геотехнических программных комплексах, исходя из многообразия и сложностей современных моделей грунта, связана с тщательным учетом различных факторов работы конструкций и основания, что требует от исследователя высокой квалификации, глубокого понимания внутрпрограммных алгоритмов, научного подхода и способности оценивать адекватность полученных результатов численных решений с их обязательной верификацией в процессе изучения объекта исследования.

Сегодня наряду с применением современных методов численного моделирования диктуется необходимость разработки сравнительно простых и удобных для практического применения инженерных методов расчета, в основе которых лежат аналитические решения без радикальных упрощений, с обоснованными предпосылками, отражающими реальную работу основания и хорошо согласующимися с опытными данными, включая результаты экспериментальных исследований, проводимых путем физического моделирования.

В рамках работы [10] предложен инженерный численный метод для определения бокового давления грунта на гибкие подпорные конструкции в зависимости от их деформаций, построенный на основе феноменологической модели сползающих наклонных блоков (рис. 1). Метод базируется на аналитическом решении и предполагает учет особенностей

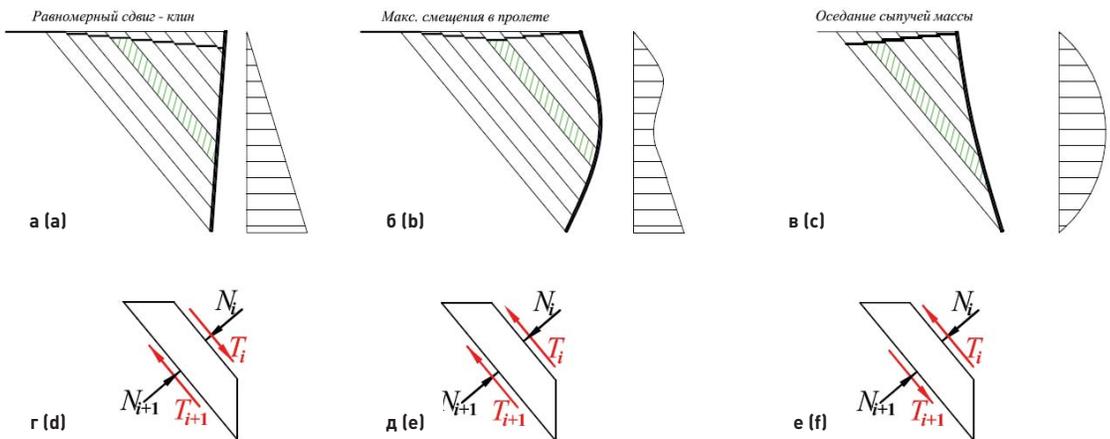


Рис. 1. Эпюры боковых давлений в зависимости от разных по характеру деформаций подпорной стенки: а – консольная схема с поворотом вокруг нижнего ребра; б – заанкеренная стенка; в – консольная схема с поворотом вокруг верхнего ребра; г, д, е – направления равнодействующих нормальных и касательных напряжений при смещении произвольной полоски грунта соответственно для случаев а, б, в

Fig. 1. Lateral pressure diagrams depending on different deformations of the retaining wall: а – cantilever model with rotation around the lower wedge; б – anchored wall; в – cantilever model with rotation around the upper edge; д, е, f – normal and shear stress resultants at displacement of an arbitrary strip of soil for а, б, с, respectively

распределения давлений в пределах призмы обрушения и действия сил трения на границах условно выделяемых наклонных блоков скольжения.

В настоящей статье приводятся результаты мелкомасштабных экспериментальных исследований модели гибкой подпорной стенки, проведенных автором в лабораторных условиях в 2021 г., направленных главным образом на верификацию предложенного ранее расчетного метода определения бокового давления грунта на гибкие подпорные конструкции [10].

Задачи и постановка эксперимента

В рамках экспериментальной части работ по исследованию распределения бокового давления грунта на гибкие подпорные стенки ставились следующие задачи:

1. Исследовать механизм деформации грунта в пределах призмы обрушения для различных кинематических условий подпорной стенки.
2. Установить соответствие применения феноменологической модели (рис. 1), использованной для разработки метода расчета ограждающих конструкций котлованов, предложенного в опубликованной ранее работе [10].
3. Качественно определить закономерность распределения активного давления, несвязанного по высоте стенки, в зависимости от величин и характера деформаций.
4. Сопоставление полученных в лабораторных условиях величин горизонтальных перемещений гибкой подпорной конструкции с данными численных расчетов.

Экспериментальные исследования для гибкой подпорной стенки выполнялись методом физического моделирования с использованием специализированного лабораторного испытательного стенда производства отечественной организации НПП «Геотек» (г. Пенза), позволяющего проводить испытания в условиях реализации плоского напряженно-деформированного состояния грунтового массива.

Объектом исследования в рамках экспериментальных работ является деформирование гибкой подпорной стенки.

Конструктивно лабораторный стенд выполнен в виде лотка с внутренними размерами: длина – 722 мм, ширина – 156 мм, высота – 536 мм, снабженного прозрачными передними и задними стенками, что дает возможность выполнять фотофиксацию поведения модели на любом этапе испытаний и выполнять интерпретации опытных результатов как методами цифровой обработки образов, так и на основе принципов фотограмметрии. Стенки выполнены из двойного стекла толщиной 12 мм. Для исключения прогибов стеклянных стенок применяются рамки жесткости в виде стальных решеток, в узлах которых расположены опорные шайбы. При помощи пневматического нагружателя имеется возможность приложения внешней нагрузки.

Общий вид лабораторного стенда в процессе проведения экспериментальных опытов представлен на рис. 2.

Опытные работы проводились в соответствии с предварительно разработанной программой экспериментальных исследований. Выбор принципиальных схем физических моделей, принятых для экспериментальных исследований, обусловлен их соответствием характерным случаям деформирования гибких подпорных конструкций и феноменологическим моделям (рис. 1).



Рис. 2. Общий вид лабораторного стенда и оборудования
Fig. 2. General view of the test bench and laboratory equipment

Схема с закреплением распорками в верхней и нижней частях подпорной стенки включает в себя частный случай деформации, представленной на рис. 1, в феноменологической модели. Разработка нового инженерного метода предполагает учитывать снижения бокового давления несвязанного грунта. Подразумевается, что за счет взаимодействия посредством трения между элементарными наклонными блоками происходит неравномерное их перемещение, вследствие чего наблюдается явление снижения давления в пролетной части. Рассматриваемая схема с закреплением распорками в верхней и нижней частях подпорной стенки обеспечивает максимальную величину свободного пролета гибкой стенки в пределах лабораторного стенда и соответственно является экстремальной и необходимой для теоретических исследований и последующей разработки метода расчета подпорных конструкций в рамках настоящей работы.

Первая серия опытов проводилась для трех различных моделей:

- для подпорной стенки, работающей по консольной схеме;
- для подпорной стенки, закрепленной в верхней части распоркой;
- для подпорной стенки, закрепленной в верхней и нижней частях распоркой.

Вторая серия опытов проводилась для моделей по тем же схемам, но с приложением дополнительной пригрузки на поверхности засыпки.

Третья серия опытов состояла из специальных испытаний, направленных на определение характера деформаций грунта в пределах призмы обрушения для различных моделей,

соответствующих моделям первой серии. Данная серия исследований предполагает предварительное размещение в моделируемый массив грунта разметочных линий, отсыпаемых из окрашенного песка.

В качестве модельного грунта засыпки для первой и второй серий опытов применялся песок средней крупности в соответствии с ГОСТ 25100-2020 [11], рыхлый (строка № 1, табл. 1), для третьей серии – песок средней крупности в соответствии с ГОСТ 25100-2020 [11], средней плотности (строка № 2, табл. 1).

В качестве модели гибкой подпорной стенки применялся лист оцинкованной стали толщиной 0,35 мм, шириной 155 мм, длиной 350 мм. Распорная система моделировалась брусками из фанеры сечением 10 × 10 мм, длиной 310 мм. В качестве пригрузки использовалась стальная гиря весом 2 кг.

Порядок испытаний предусматривал выполнение отсыпки модельного грунта до необходимого уровня в соответствии с принятой схемой испытания с параллельной установкой модели гибкой подпорной стенки, распорной системы. Для третьей серии опытных работ по мере устройства засыпки грунта производилось размещение разметочных линий.

До начала процесса фотографической съемки под стеклом внутри лотка размещались масштабные линейки для последующего определения масштаба. В процессе проведения опыта фиксировалось положение гибкой подпорной стенки, соответствующее различным характерным этапам. Последующая обработка заключалась в наборе операций. Производились отбор и сортировка полученных фотоизображений. Корректировалась дисторсия и прочие искажения (виньетирование, хроматические аберрации) объектива путем применения встроенных профилей Adobe, которые основываются на метаданных EXIF для конкретной модели фотокамеры и объектива. Далее при помощи графического программного обеспечения Adobe выполнялось ручное совмещение подготовленных фотоснимков, содержащих характерные этапы эксперимента и масштабные линейки, с последующим прямым измерением горизонтальных перемещений модели попиксельно.

Результаты экспериментальных исследований

В процессе проведения испытания, фотофиксации положения гибкой подпорной стенки и последующей обработки фиксировались горизонтальные перемещения подпорной конструкции.

В лабораторных условиях в соответствии с ГОСТ 12536-2014 [12] определялся гранулометрический состав песчаного грунта, применяемого в опытных исследованиях, и физические характеристики грунта засыпки в соответствии с ГОСТ 5180-2015 [13]. Результаты лабораторных исследований физических свойств грунтов сведены и представлены в табл. 1. Угол внутреннего трения песчаного грунта определялся путем прямого замера предельного угла заложения откоса для применяемых в опытах грунтов засыпки. Для указанных песков угол внутреннего трения составляет 30°.

Для обеспечения контроля и проверки адекватности полученных в результате бесконтактного способа измерения перемещений гибкой подпорной стенки в процессе проведения лабораторных исследований была выполнена серия численных экспериментов по аналогичным схемам и условиям в масштабе 1:1. Для этой задачи был задействован сертифицированный программный комплекс Plaxis 2D 2019.

Таблица 1

Результаты лабораторных исследований физических свойств грунтов

Table 1

Results of laboratory tests for physical properties of soils

№ п/п	Гранулометрический состав, %								При- родная влаж- ность	Плот- ность влажно- го грунта	Плот- ность сухого грунта	Плот- ность частиц грунта	Пори- стость	Коэф- фициент пористо- сти	Сте- пень влаж- ности	Наименование грунта по ГОСТ 25100-2020 «Грунты. Классификация» [11]
	Размер частиц, мм															
	> 10	10-5	5-2	2-1	1-0,5	0,5- 0,25	0,25- 0,1	< 0,1								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
									W, д.е.	$P, \text{г/см}^3$	$P_d, \text{г/см}^3$	$P_s, \text{г/см}^3$	$n, \%$	e	$S_r, \text{д.е.}$	Песок средней крупности, рыхлый, малой степени водо- насыщения
1	-	-	-	0,1	1,1	49,1	49,0	0,7	0,001	1,54	1,54	2,66	42,0	0,73	0,004	
2	-	-	-	-	7,2	65,2	26,0	1,6	0,001	1,63	1,63	2,66	38,7	0,63	0,004	Песок средней круп- ности, средней плот- ности, малой степени водонасыщения

Для получения эпюр давлений и внутренних усилий использовались полученные в ходе опытов значения горизонтальных перемещений стенки. Определение величин внутренних усилий, давлений и их распределение вдоль подпорной стенки выполнялось методом последовательного дифференцирования. При необходимости и для увеличения точности использовалось предварительное интерполирование и экстраполирование дифференцируемых функций.

На рис. 3 и 4 представлены эпюры давлений, полученные путем пересчета по методике, описанной выше, на основании экспериментально определенных в ходе испытаний значений горизонтальных перемещений стенок.

Проведение лотковых экспериментов и их последующая обработка позволили в целом подтвердить результаты опытных исследований прошлых лет [14–17]. Анализ эпюр бокового давления грунта, полученных пересчетом на основании экспериментально определенных значений горизонтальных перемещений стенок, позволяет сделать вывод о перераспределении давления грунта вдоль стенки в зависимости от характера ее деформаций. Эпюра давлений в случае консольной схемы близка по форме и величинам к теоретически расчетной

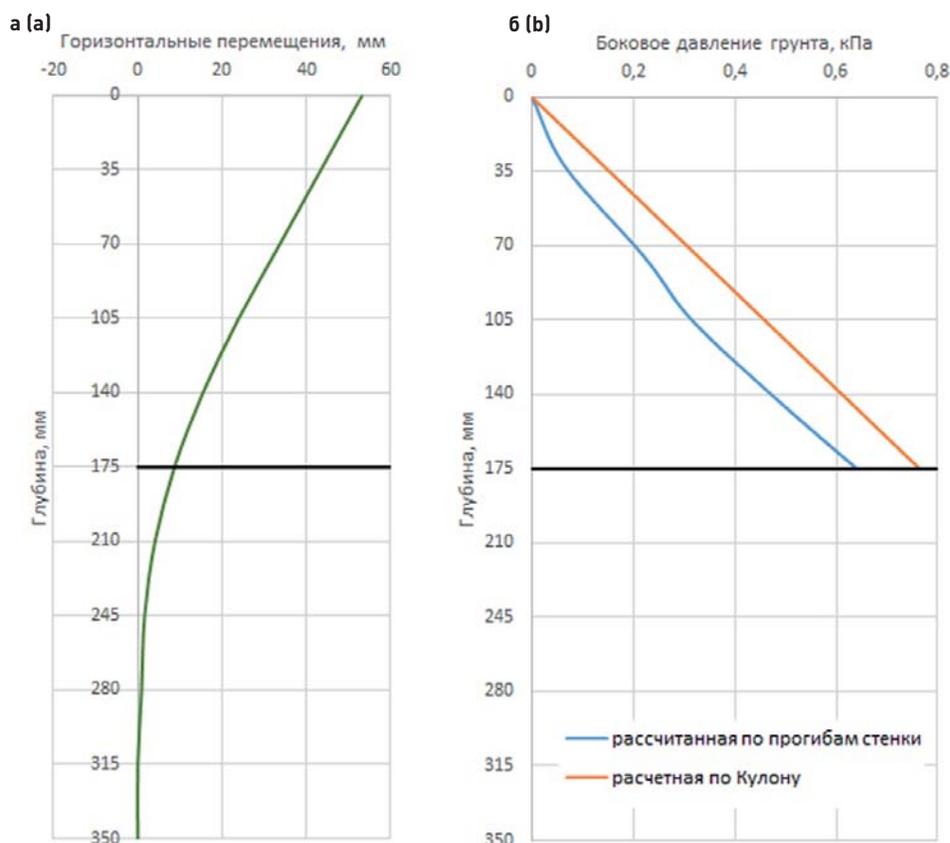


Рис. 3. Результаты экспериментальных исследований консольной стенки: *a* – эпюра прогибов; *b* – эпюра давления, рассчитанная по прогибам стенки в сопоставлении с эпюрой активного давления, определенного по классической теории Кулона

Fig. 3. Results of experimental tests of the cantilever wall: *a* – deflections diagram; *b* – pressure diagram computed from the wall deflections in comparison with active pressure diagram obtained by the classical Coulomb's theory

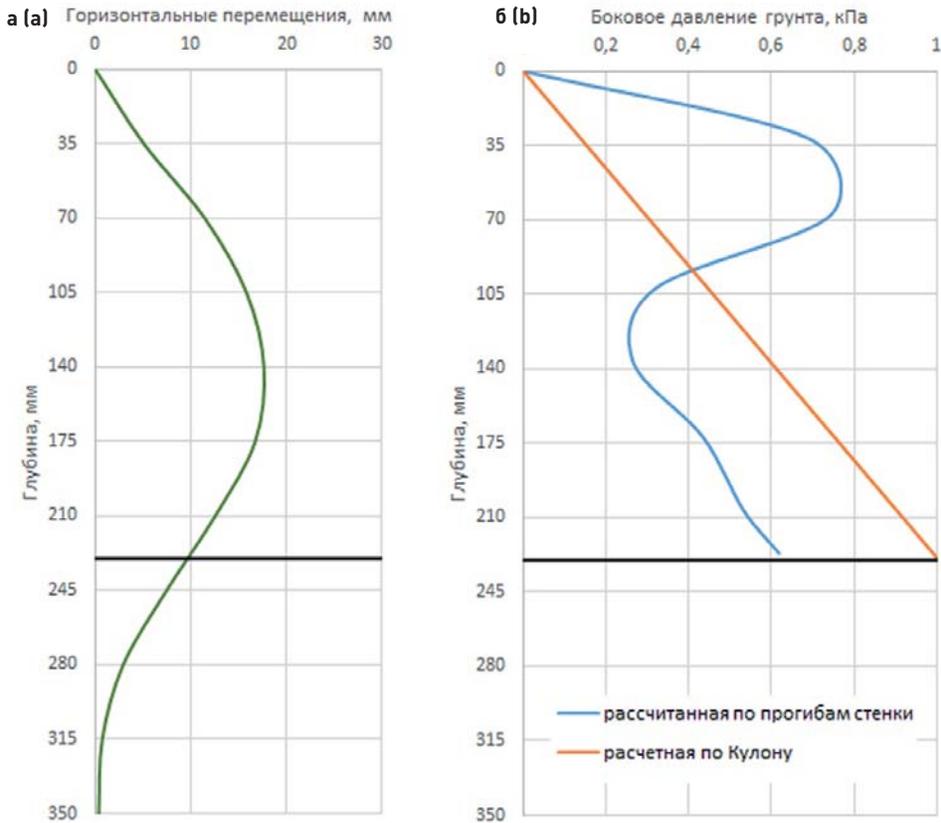


Рис. 4. Результаты экспериментальных исследований заанкеренной стенки: *a* – эпюра прогибов; *b* – эпюра давления, рассчитанная по прогибам стенки в сопоставлении с эпюрой активного давления, определенного по классической теории Кулона

Fig. 4. Results of experimental tests of the anchored wall: *a* – deflections diagram; *b* – pressure diagram computed from the wall deflections in comparison with active pressure diagram obtained by the classical Coulomb's theory

треугольной эпюры, полученной по методу Кулона (рис. 3). Опыты, проведенные по схеме с закреплением верхнего конца стенки, показывают, что экспериментальные эпюры давлений грунта отличаются от расчетных давлений, определяемых в соответствии с теорией Кулона (рис. 4). Отмечается следующий характер перераспределения давления:

- в верхних приопорных зонах, близких к местам распорного крепления, происходит концентрация давлений, при этом увеличение значений эпюр превышает давления, определенные по Кулону, приблизительно в 3 раза;
- в пролетной части наблюдается уменьшение эпюры давления приблизительно в 2 раза, ниже эпюра давлений снова увеличивается;
- размеры зон концентрации и уменьшения давлений и их положение по высоте вдоль стенки зависят от величины пролета подпорной конструкции.

Следует отметить, что суммарные площади эпюр давления грунта приблизительно равны эпюрам, полученным по методу Кулона, таким образом можно сделать вывод о том, что для стенки интегральное давление, полученное пересчетом методом последовательного

дифференцирования на основе зафиксированных горизонтальных перемещений стенки, соответствует по величине теоретическому, определенному по классическому методу.

Наибольший интерес представляет третья серия опытных работ, состоявшая из специальных испытаний, направленных на определение характера деформаций грунта в пределах призмы обрушения. В процессе исследований были получены результаты, описанные ниже.

Характер деформаций, зафиксированных при помощи разметочных линий, отсыпанных из окрашенного песка и по форме линии осадки поверхности засыпки (рис. 5), качественно соответствует картине изополей общих перемещений, полученных в серии численных экспериментов по аналогичным схемам и условиям (рис. 6). Принимая во внимание феноменологическую модель (рис. 1) и расчетную схему метода наклонных блоков, представленных в [10], и с учетом полученных в рамках лабораторного эксперимента фактических величин горизонтальных перемещений подпорной стенки можно выполнить геометрические построения, показанные на рис. 7, которые учитывают локальные смещения наклонных блоков грунта в зависимости от характера и величин деформаций опытной подпорной стенки.

На рис. 7 зеленая, красная и светло-желтая сплошные линии соответствуют положению разметочных линий в исходной схеме испытания. Пунктирные цветные линии соответствуют положению разметочных линий в деформированной схеме, полученной в ходе испытания (рис. 5). Голубые линии соответствуют ординатам величин горизонтальных перемещений стенки, измеренным в ходе испытания. Тонкими серыми и пунктирными черными линиями показано положение наклонных блоков, соответствующее исходной и деформированной схеме.

Проделанные геометрические построения (рис. 7) и их сопоставление с картиной экспериментальных исследований (рис. 5 и 6) отражают соответствие характера деформирования грунта засыпки в ходе лабораторных испытаний, в результате численного моделирования и для модели наклонных блоков с учетом различных характерных схем деформирования гибкой подпорной стенки, рассматриваемых в настоящей работе.

Заключение

В рамках настоящей статьи рассмотрены и проанализированы результаты экспериментальных и расчетных данных, полученных в процессе комплексного исследования поведения гибкой подпорной стенки и массива грунта засыпки за ней.

Сопоставление полученных в лабораторных условиях величин горизонтальных перемещений гибкой подпорной конструкции с данными численных расчетов показывает качественное соответствие опытных показателей с результатами численного моделирования, что подтверждает корректность подобранных схем испытаний и адекватность полученных в результате измерения перемещений гибкой подпорной стенки. Экспериментальные исследования в целом позволили показать и подтвердить тот факт, что различные по характеру деформации гибкой подпорной стенки влияют на распределение давлений по высоте. Эпюра давлений в случае консольной схемы близка по форме и величинам к теоретически расчетной треугольной эпюре, полученной по методу Кулона. Опытные схемы с закреплением верхнего конца стенки показывают, что экспериментальные эпюры давлений грунта отличаются от расчетных давлений, определяемых в соответствии с теорией Кулона. В приопорных зонах отмечается концентрация давлений, в пролетной части наблюдается уменьшение эпюры давления, ниже эпюра давлений снова увеличивается. Размеры и положение по высоте зон



Рис. 5. Деформированные схемы, полученные для различных схем работы подпорной стенки
Fig. 5. Deformed models obtained for different retaining wall operations

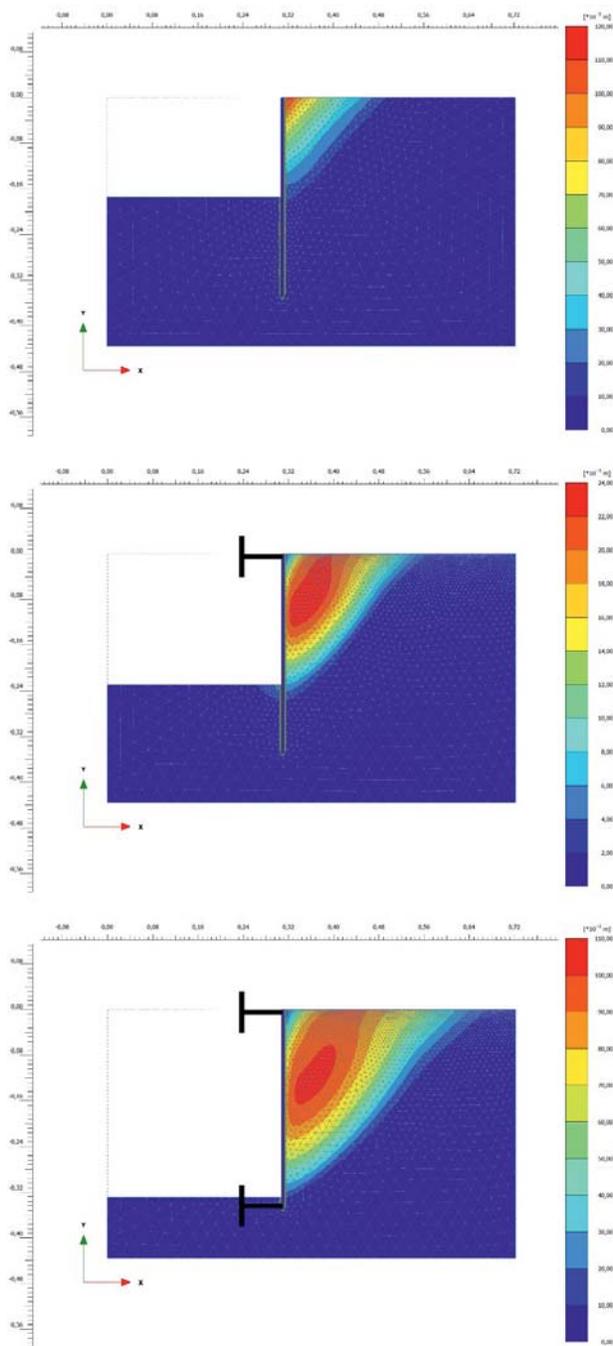


Рис. 6. Численное моделирование в Plaxis. Изополя общих перемещений в массиве грунта, полученных для схем работы подпорной стенки, соответствующих опытным
Fig. 6. Numerical simulation in Plaxis. Isofields of total displacements in the soil mass obtained for retaining wall operation models corresponding to the experimental ones

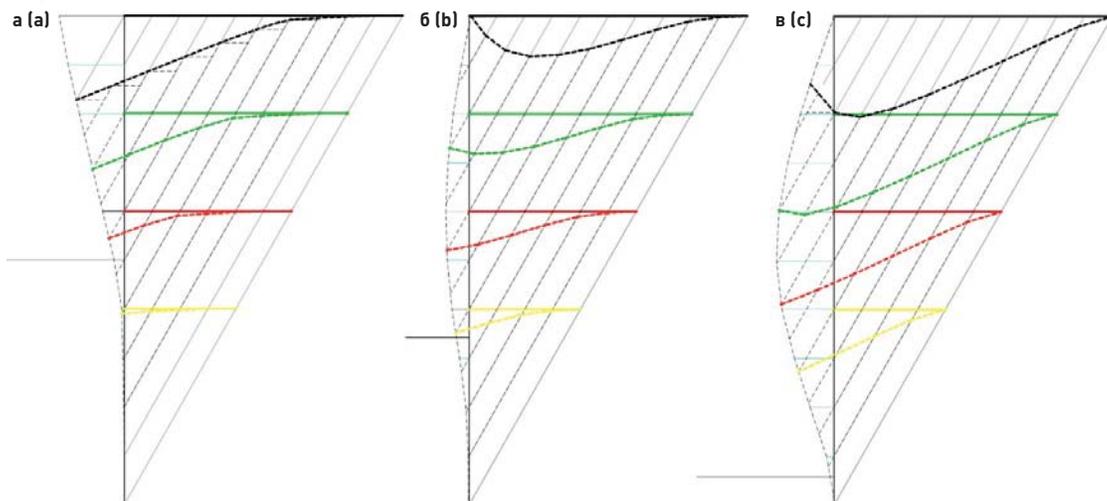


Рис. 7. Геометрические построения, соответствующие схемам опытных исследований и включающие в себя совмещение исходного и деформированного состояний подпорной стенки и массива грунта засыпки с учетом предлагаемой в [10] расчетной модели метода наклонных блоков: а – консольная стенка; б – стенка, закрепленная в верхней части распоркой; в – стенка, закрепленная в верхней и нижней частях распоркой

Fig. 7. Geometric constructions corresponding to the experimental models and including combination of the initial and deformed conditions of the retaining wall and the backfill soil mass taking into account the computational method of the inclined blocks proposed in [10]: a – cantilever wall; b – wall braced in the upper part; c – wall braced in the upper and lower parts

концентрации и уменьшения давлений вдоль стенки зависят от величин пролета подпорной конструкции.

Проделанные геометрические построения и их сопоставление с картиной экспериментальных исследований отражают соответствие характера деформирования грунта засыпки в ходе лабораторных испытаний, в результате численного моделирования и для модели наклонных блоков с учетом различных характерных схем деформирования гибкой подпорной стенки, рассматриваемых в настоящей работе.

Разработка инженерного численного метода определения бокового давления грунта в зависимости от характера деформирования гибкой подпорной конструкции с применением модели наклонных блоков грунта и с учетом их локальных смещений внутри призмы обрушения, в соответствии с проведенными экспериментальными исследованиями, является обоснованной.

Список литературы

1. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Фролов К.Е., Пашенко Ф.А., Зюзина О.В. Экспериментальные исследования железобетонных подпорных стен. *Природообустройство*. 2020;(1):72–79. <https://doi.org/10.34677/1997-6011/2020-1-72-79>
2. Saez E., Segaline H., Ubilla J., Llanquilef B. 1-G Experimental study of dynamic pressures and soil displacements in Yielding Rigid Retaining Walls using a transparent laminar box. *Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Sydney; 2022, pp. 1193–1197.

3. *Deng C., Haigh S.K.* Sand deformation mechanisms mobilised with active retaining wall movement. *Geotechnique*. 2022;72(3):260–273. <https://doi.org/10.1680/jgeot.20.p.041>
4. *Yang M., Tang X., Wu Z.* Slip Surface and Active Earth Pressure of Cohesionless Narrow Backfill behind Rigid Retaining Walls under Translation Movement Mode. *International Journal of Geomechanics*. 2020;20(8):04020115. [https://doi.org/10.1061/\[asce\]gm.1943-5622.0001746](https://doi.org/10.1061/[asce]gm.1943-5622.0001746)
5. *Xu L., Lin Y.* Experimental Study on the Active Earth Pressure of Narrow Cohesionless Backfills against Rigid Retaining Wall under the Translation Mode. *Advances in Civil Engineering*. 2020;(7):1–9. <https://doi.org/10.1155/2020/8889749>
6. *Бенмебарек Н., Лабди Х., Бенмебарек С.* Численное исследование активного давления грунта на жесткую подпорную стенку при различных режимах перемещения. *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2016;(1):24.
7. *Alavinezhad S.P., Shahir H.* Determination of apparent earth pressure diagram for anchored walls in c-φ soil with surcharge. *World Journal of Engineering*. 2020;17(4):481–489. <https://doi.org/10.1108/wje-09-2019-0269>
8. *Orazalin Z., Whittle A., Olsen M.* Threedimension analyses of excavation support system for the strata center basement on the MIT campus. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2015;141(7):1–14. [https://doi.org/10.1061/\[asce\]gt.1943-5606.0001326](https://doi.org/10.1061/[asce]gt.1943-5606.0001326)
9. *Sharma S., Vinod Prabhu N., Naveen Y., Bhuvaneshwari S.* Numerical Modelling of Lateral Deformation of the Cantilever Retaining Wall in Expansive Clays. In: *Saride S., Umashankar B., Avirneni D.* (eds). *Advances in Geotechnical and Transportation Engineering. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 71. Springer, Singapore; 2020, pp. 233–247. https://doi.org/10.1007/978-981-15-3662-5_19
10. *Брыксин В.В.* Расчет ограждающих конструкций котлованов методом наклонных блоков. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2018;17(2):35–49.
11. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. Москва: Стандартинформ; 2020.
12. ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. Москва: Стандартинформ; 2019.
13. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. Москва: Стандартинформ; 2019.
14. *Дуброва Г.А.* Взаимодействие грунта и сооружений. Москва: Речной транспорт; 1963.
15. *Лазебник Г.Е.* Исследование распределения давления грунта на модели гибких одноанкерных подпорных стенок. *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 1966;(2):3–5.
16. *Rowe P.W.* Anchored Sheet-Pile Walls. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. 1952;1(1):27–70. <https://doi.org/10.1680/iicep.1952.10942>
17. *Гончаров Ю.М.* Экспериментальное исследование взаимодействия шпунтового ограждения и грунта. В: *Механика грунтов. Труды Научно-исследовательского института оснований и подземных сооружений*. Сб. 43. Москва: Госстройиздат; 1961, с. 27–41.

References

1. *Rubin O.D., Lisichkin S.E., Frolov K.E., Pashchenko F.A., Zyuzina O.V.* Experimental studies of reinforced concrete retaining walls. *Prirodoobustrojstvo*. 2020;(1):72–79. (In Russian). <https://doi.org/10.34677/1997-6011/2020-1-72-79>
2. *Saez E., Segaline H., Ubilla J., Llanquilef B.* 1-G Experimental study of dynamic pressures and soil displacements in Yielding Rigid Retaining Walls using a transparent laminar box. *Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Sydney; 2022, pp. 1193–1197.
3. *Deng C., Haigh S.K.* Sand deformation mechanisms mobilised with active retaining wall movement. *Geotechnique*. 2022;72(3):260–273. <https://doi.org/10.1680/jgeot.20.p.041>
4. *Yang M., Tang X., Wu Z.* Slip Surface and Active Earth Pressure of Cohesionless Narrow Backfill behind Rigid Retaining Walls under Translation Movement Mode. *International Journal of Geomechanics*. 2020;20(8):04020115. [https://doi.org/10.1061/\[asce\]gm.1943-5622.0001746](https://doi.org/10.1061/[asce]gm.1943-5622.0001746)
5. *Xu L., Lin Y.* Experimental Study on the Active Earth Pressure of Narrow Cohesionless Backfills against Rigid Retaining Wall under the Translation Mode. *Advances in Civil Engineering*. 2020;(7):1–9. <https://doi.org/10.1155/2020/8889749>

6. *Benmebarek N., Labdi H., Benmebarek S.* Numerical study of active soil pressure on a rigid retaining wall under various modes of movement. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2016;(1):24. (In Russian).
7. *Alavinezhad S.P., Shahir H.* Determination of apparent earth pressure diagram for anchored walls in c-φ soil with surcharge. *World Journal of Engineering*. 2020;17(4):481–489. <https://doi.org/10.1108/wje-09-2019-0269>
8. *Orazalin Z., Whittle A., Olsen M.* Threedimension analyses of excavation support system for the strata center basement on the MIT campus. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2015;141(7):1–14. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001326](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001326)
9. *Sharma S., Vinod Prabhu N., Naveen Y., Bhuvaneshwari S.* Numerical Modelling of Lateral Deformation of the Cantilever Retaining Wall in Expansive Clays. In: *Saride S., Umashankar B., Avirneni D.* (eds). *Advances in Geotechnical and Transportation Engineering. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 71. Springer, Singapore; 2020, pp. 233–247. https://doi.org/10.1007/978-981-15-3662-5_19
10. *Bryksin V.V.* Calculation of retaining walls by method of inclined blocks. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2018;17(2):35–49. (In Russian).
11. State Standard 25100-2020. *Soils. Classification*. Moscow: Standartinform Publ.; 2020. (In Russian).
12. State Standard 12536-2014. *Soils. Methods of laboratory granulometric (grain-size) and microaggregate distribution*. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. (In Russian).
13. State Standard 5180-2015. *Soils. Laboratory methods for determination of physical characteristics*. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. (In Russian).
14. *Dubrova G.A.* Interaction of soil and structures. Moscow: Rechnoi transport Publ.; 1963. (In Russian).
15. *Lazebnik G.E.* Investigation of the distribution of soil pressure on a model of flexible single-tank retaining walls. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1966;(2):3–5. (In Russian).
16. *Rowe P.W.* Anchored Sheet-Pile Walls. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. 1952;1(1):27–70. <https://doi.org/10.1680/iicep.1952.10942>
17. *Goncharov Yu.M.* Experimental study of the interaction of sheet pile fencing and soil. In: *Soil mechanics. Proceedings of the Scientific Research Institute of Foundations and Underground Structures*. Vol. 43. Moscow: Gosstroizdat; 1961, pp. 27–41. (In Russian).

Информация об авторе / Information about the author

Виталий Владимирович Брыксин, старший научный сотрудник лаборатории методов расчета подземных сооружений и геотехнического прогноза, НИИОСП им. Н.М. Герсевича АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: geo.pgs@mail.ru

тел.: +7 (926) 581-94-28

Vitaly V. Bryksin, Senior Researcher, Laboratory of Methods for Calculating Underground Structures and Geotechnical Forecasting, Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gershevich, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: geo.pgs@mail.ru

tel.: +7 (926) 581-94-28