

Сравнение конструктивно-технологических решений подпорной стенки, усиленной грунтовыми анкерами

А.Ю. Прокопов¹, Г.В. Еганян¹, В.О. Кузнецов²

¹*Донской государственной технической университет, Ростов-на-Дону*

²*АО «Институт «Стройпроект»*

Аннотация: В статье рассматривается проектирование подпорного сооружения в сложных инженерно-геологических условиях с учётом зарубежных и российских нормативных требований. Авторами представлено два конструктивных решения подпорной стены из ряда буровых свай, выполненных по российским и зарубежным нормативным предпосылкам. Для обоих вариантов сооружения определены и сопоставлены параметры напряженно-деформированного состояния. В заключении сделан вывод, что конструкция подпорной стенки, выполненная по зарубежным нормативным предпосылкам, получилась значительно экономичнее.

Ключевые слова: подпорная стенка, грунтовый анкер, расчёт, защитное сооружение, проектирование, удерживающее сооружение, буронабивные сваи, автомобильная дорога, устойчивость, конструкция, дорожное строительство

Введение

Проектирование и строительство удерживающих сооружений на автомобильных дорогах в сложных инженерно-геологических условиях часто сопряжено с высокой опасностью развития склоновых процессов. Как правило, они выражены оползнями, обвалами и осыпями. Так при строительстве дорог для активизации опасных процессов наиболее часто служат такие техногенные воздействия как срезка и перепланировка естественного рельефа склона, а также изменение режима стока и фильтрации грунтовых вод. Необходимость учитывать различные природные факторы и процессы воздействующие на автомобильную дорогу является одним из основополагающих принципов в проектировании транспортного сооружения. Большое значение этому принципу придаёт тот факт, что автомобильная дорога имеет теснейшую связь с геологической средой и всеми теми глубинными природными процессами. Более того, эта взаимосвязь усугубляется линейным характером данного инженерного сооружения, так как указанное взаимодействие для одной и той же дороги

осуществляется на значительной протяженности поверхности геологической среды со всеми микро- и макро- особенностями последней.

Традиционная практика трассирования дорог в оползневых условиях предписывает обходить такие места в связи с необходимостью обычно чрезмерно больших затрат на обеспечение их устойчивости. Однако современных реалиях строительство автомобильной дороги в большей степени учитывает требования заказчика по обеспечению удобного, безопасного и экономичного движения автомобильного транспорта.

Анализ действующих отечественных нормативных документов по проектированию и строительству автомобильных дорог показывает, что вопросы учета оползневых процессов в дорожной практике вообще отражены в них достаточно схематично, а разработку конкретных решений рекомендуется производить в порядке индивидуального проектирования (см. п. 7.57 СП 34.13330.2021).

Значительный вклад в разработку методов проектирования защитных (удерживающих) сооружений на автомобильных дорогах внесли ученые Гольдштейн М.Н. [1], Гинзбург Л.К. [2], Маслов Н.Н. [3], Добров Э. М. [4], В.Д. Браславский и др [5].

Целью настоящей статьи является анализ конструктивных требований к консольной подпорной стенке, усиленной грунтовыми анкерами, в сложных инженерно-геологических условиях. Анализируются требования по российским и немецким стандартам на примере сооружения, расположенного на участке строительства новой автомобильной дороги в Ворошиловском районе г. Волгограда.

Методы и материалы исследования

Для исследований использованы методы расчета подпорных стен, применяемые в строительной механике, с использованием программно-вычислительного комплекса DC-Baugrube.

Цель расчета – определение параметров напряженно-деформированного состояния подпорной стенки с анкерным усилением.

Исходными данными являются:

1. Аналитические модели подпорных стен с грунтовыми анкерами, основанные на теории предельного равновесия, созданные в программном комплексе DC-Baugrube.

2. Результаты инженерно-геологических изысканий на участке строительства подъездной автомобильной дороги Волгоградской области в Ворошиловском районе г. Волгограда;

3. Данные топоъемки участка строительства.

При определении усилий учитывались следующие нагрузки и воздействия на подпорное сооружение: вес подпорного сооружения, вес грунта засыпки, усилия в анкерах.

При анализе подпорной стены без анкерных креплений применялся метод построения эпюр активного и пассивного давлений грунта, базирующийся на теории предельного равновесия Ш. Кулона, согласно которому поверхности обрушения и выпирания грунта являются плоскими [6-8].

Расчёт подпорных стен с анкерным усилением выполнен методом Кранца, основанный на построении многоугольника сил. Согласно данному методу, оптимальное положение анкера в грунте подбирают в процессе расчета устойчивости системы «ограждение-анкер-грунт» на опрокидывание вокруг низа анкеруемой стенки исходя из условия, что прочность грунтов на сдвиг преодолена и образуется глубокая линия скольжения [9]. В качестве глубокой линию скольжения принимают отрезок между центром поворота анкеруемой стенки в точке b и точкой c , расположенной в центре корневой части анкера (см. Рис. 1).

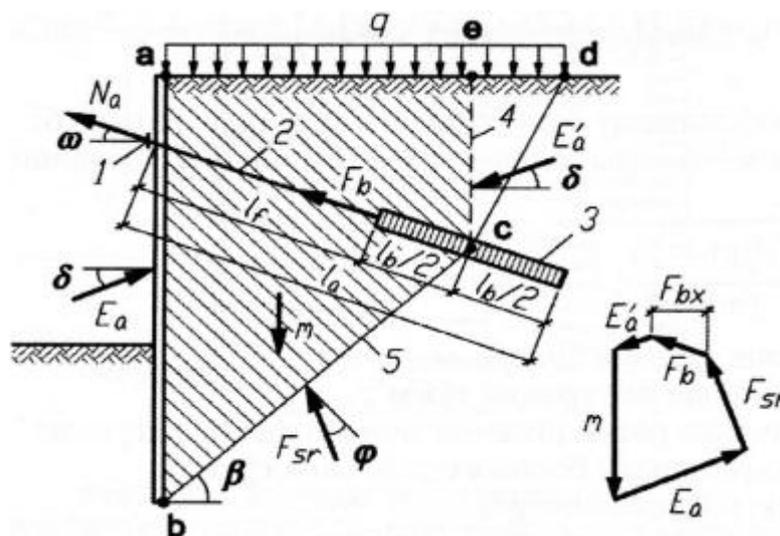


Рис. 1. – Расчетная схема оценки устойчивости ограждения по методу Кранца: 1 – оголовок; 2 – анкерная тяга; 3 – зона заделки; 4 – фиктивная анкерная стенка; 5 – глубокая линия скольжения; $abce$ – призма сдвижения грунта;

Оценка устойчивости подпорной стены заключается, в решении плоской задачи: рассматривая условия равновесия массива пород и тела сооружения шириной 1 м, условно "вырезанного" из массива склона по направлению ожидаемого смещения.

Для расчетов в качестве модели был выбран участок строительства подъездной автомобильной дороги Волгоградской области в Ворошиловском районе г. Волгограда и отвечающий одному из главных запросов при проектировании подпорных сооружений – склоновые процессы. На рисунке 2 приведен общий вид на данный участок.

Вся территория участка является береговым склоном с ровным рельефом и уклоном в сторону р. Волга. Только в верхней части рельеф бугристый. Оползневые грунты, слагающие береговой склон, повсеместно перекрыты насыпными песчаными и глинистыми грунтами. На основании результатов инженерно-геологических изысканий на рассматриваемой территории были выявлено четыре инженерно-геологических элемента, физико-механические характеристики которых приведены в таблице 1. В

связи с наличием в разрезе специфических грунтов и развитием оползневых процессов, инженерно-геологические условия оцениваются как сложные.



Рис. 2. – Месторасположение участка исследований

Таблица № 1

Физико-механические характеристики грунтов участка изысканий

№ ИГЭ	Наименование грунта	Модуль деформации E, кПа	Удельный вес ρ_l , кН/м ³	Природная влажность w	Показатель текучести I _L	Коэффициент пористости e	Число пластичности I _p	Удельное сцепление c _л , кПа	Угол внутреннего трения ϕ_l , °
1	Песок рыхлый средней крупности с включением строительного мусора, ниже УГВ водонасыщенные	19	16,7	0,088	–	0,73	–	–	29
2	Глина серо-бурая, легкая пылеватая, мягкопластинчатая, непросадочная, незасоленная, ненабухающая (оползневой)	7,3	17,3	0,463	0,63	1,302	23,2	36	16
3	Песок рыхлый средней крупности, водонасыщенный	19	19,5	0,264	–	0,72	–	–	29
4	Суглинок темно-серый, легкий песчанистый, твердый, непросадочный, незасоленный, ненабухающий	15,3	1,91	0,297	-0,35	0,82	8,4	67	27

Конструктивно-технологические решения основного варианта

Данный объект предполагает проектирование новой четырёхполосной автомобильной дороги в категории Магистральная улица общегородского значения 3 класса-регулируемого движения. С правой стороны по ходу пикетажа проектом предусматривается устройство удерживающих сооружений. Наличие удерживающих сооружений обусловлено необходимостью сохранения устойчивости склона и не возможностью размещения нормативных откосов верховых склонов выемки, а также отсутствием полосы отвода для устройства откосов насыпи автомобильной дороги.

Условия площадки строительства предполагает наличие плотной городской застройки, в связи с чем, исключено применение ударных механизмов и использование конструкций сборных железобетонных свай. Кроме того, ввиду наличия городской застройки на вершине склона, отсутствует возможность устройства открытого котлована, либо применение конструкций армогрунтовых подпорных стен. На рисунке 3 приведён поперечный профиль участка строительства.

В связи со стесненными граничными условиями и не возможностью устройства котлованов, наиболее оправданным решением выглядит создание подпорной стенки из железобетонных буровых свай, обладающие высокой несущей способностью и жесткостью [10]. Сваи располагаются с шагом 2,50 м, а между ними монтируется прижимная плита. Технология их монтажа абсолютно безопасна при устройстве вблизи существующей застройки. Причем для бурения достаточно использовать легкое малогабаритное буровое оборудование, способного разместится в сложных стесненных условиях.

В соответствии с частью 3.4 статьи 49 Градостроительного кодекса Российской Федерации проектная документация данного объекта подлежит

обязательной экспертизе в Главгосэкспертизе. Следовательно, для получения положительного заключения необходимо принять такие конструктивно-технологические решения, которые точно соответствовали действующим отечественным нормам и правилам проектирования.

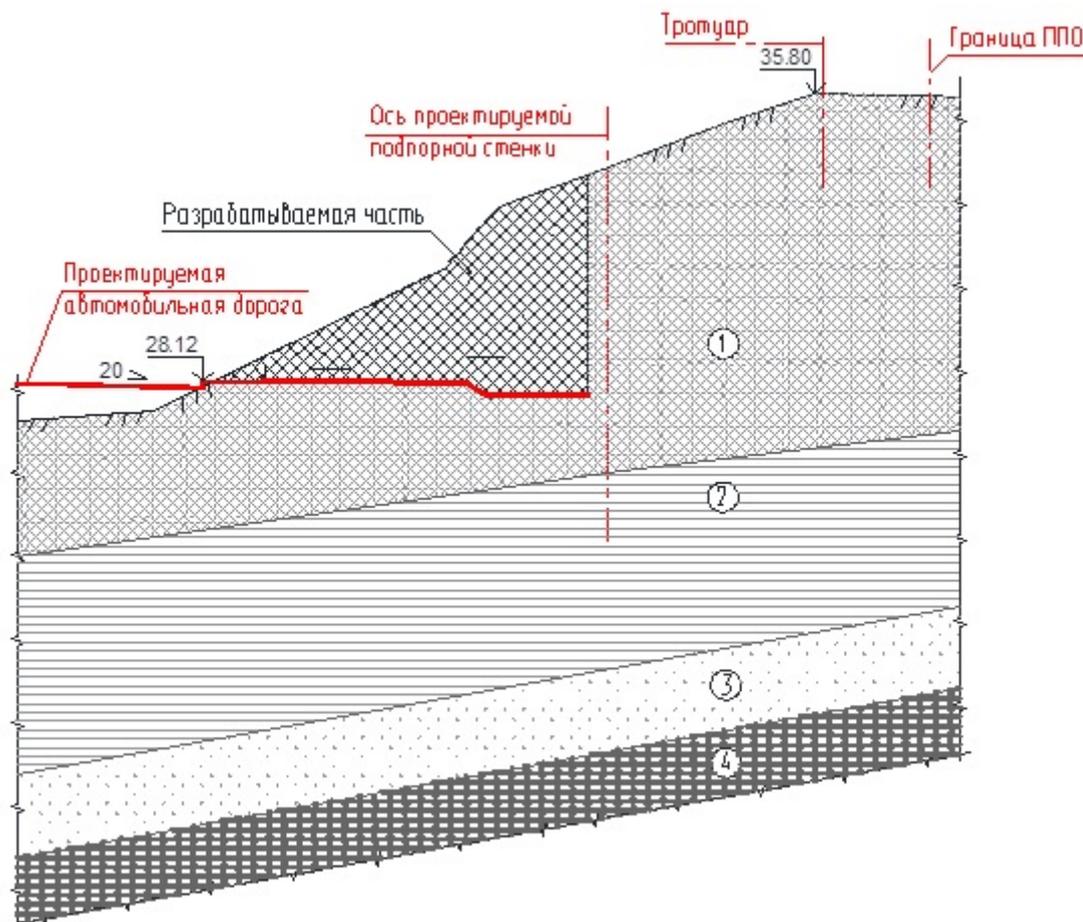


Рис. 3. – Поперечный профиль участка строительства

Принятое решение относится к свайной конструкции и требует руководствоваться помимо СП 381.1325800.2018 «Подпорные сооружения», так и СП 24.1330.2021 «Свайные фундаменты». Руководствуясь пунктом 8.14 СП 24.1330.2021 опирание нижних концов буровых свай на рыхлые пески и глинистые грунты с показателем текучести более 0,60 не рекомендуется. В нашем случае необходимо прорезать слой ИГЭ-2, так как он является оползневым с показателем текучести 0,63, а также ИГЭ-3, представляющий собой рыхлый песок. Опираются сваи будут на ИГЭ-4 (суглинок твердый,

непросадочный) с заглублением её подошвы на 2,0 м согласно п. 7.2.11 СП 24.13330.2021.

По предварительным расчётам подпорной стены, сопротивляющейся сдвигу и опрокидыванию только лишь за счёт заделки в грунт, выявились значительные в верхней части перемещения в размере 25,30 см, а при возможном ухудшении грунтовых условий в случае неточностей геологических изысканий более 50 см. Данные показатели можно считать удовлетворительными для использования подобных конструкций в котлованах, с последующей их обратной засыпкой. Однако наше удерживающее сооружение используется на постоянной эксплуатационной основе, а лицевая грань сооружения является архитектурным фасадом вдоль будущей автодороги с облицовкой керамогранитом. Эти обстоятельства накладывают необходимость усиления принятой конструкции, с целью повысить несущую способность и уменьшением перемещения.

В связи с особенностями участка строительства наиболее рациональным решением по усилению сооружения является применение грунтовых анкеров. Анкерная крепь не загромождает пространство у низа подпорной стены, а применение современных высокопроизводительных строительных машин, способных охватить широкий фронт работ, что значительно упрощает и сокращает сроки строительно-монтажных работ [11-13].

Бурение в несущем каркасе буронабивных свай не представляется возможным, в связи с чем сваи расставляются с определенным шагом, сохраняя минимальное расстояние в свету между сваями 1,00 м. Для обеспечения совместной работы свай, предусмотрено выполнение монолитной железобетонной обвязочной балки высотой 1,00 м поверх свай. Предотвращения инфильтрации подземных вод через тело подпорных стен реализуется устройством железобетонной прижимной стенки толщиной 0,40

м. Прижимная стенка представляет собой монолитную железобетонную стену переменной высоты с шириной в уровне планировки 0,40 м с основанием на фундаментной балке. В прижимной стенке устраиваются дренажные отверстия с шагом 2,5 м. Для обеспечения совместной работы грунтовых анкеров и свай, между сваями в прижимных стенках устраиваются скрытые балки, высотой 0,9 м в два ряда, которые анкеруются в конструкцию свай при помощи арматурных выпусков на клеевом составе.

Расположение середины корня анкера в грунтовом массиве назначается согласно пункту 3.1.10 ВСН 506-88. Согласно данному требованию заделку анкеров, применяемых для закрепления ограждений котлованов и подпорных стен, следует располагать за воображаемой плоскостью, проходящей через низ стенки под углом 45° . Таким образом консервативно принимается расположение корня анкера за предполагаемой линией скольжения круглоцилиндрической поверхности, т. е. без учёта угла внутреннего трения в отличие от зарубежной методики.

Принятые технические решения по подпорной стенке представлены в таблице 2 и на рисунке 4.

Таблица № 2

Основные технические решения по подпорной стенке

Параметр	Единица измерения	Значение
Высота над поверхностью	м	7,00
Глубина заделки	м	10,00
Диаметр свай	мм	1000
Шаг свай в ряду	мм	2500
Длина верхнего анкера 1	м	22,70
Длина нижнего анкера 2	м	21,40
Угол наклона анкеров	град.	25

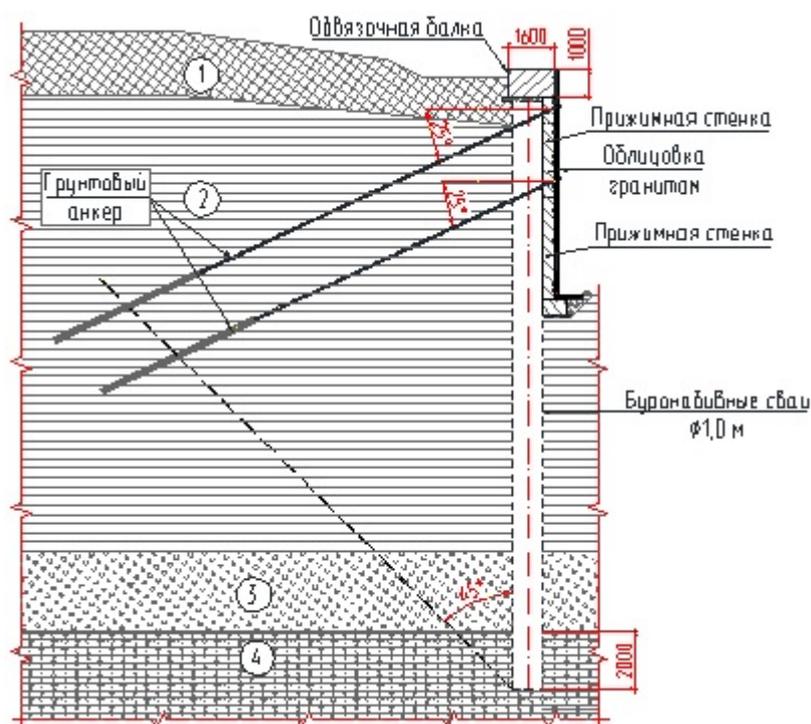


Рис. 4 – Принятое техническое решение подпорной стенки

В проекте производства работ принята следующая последовательность монтажа конструкции:

- 1 этап: монтаж буровых свай (бурение скважин, установка арматурного каркаса, бетонирование под защитной обсадной трубой);
- 2 этап: разработка котлована выемки до уровня низа первой скрытой балки, т.е. на глубину 2,5 м от проектной поверхности рельефа;
- 3 этап: установка первого анкера;
- 4 этап: повторная разработка котлована до уровня низа второй скрытой балки. Глубина разработки второго этапа составляет 5,0 м. Первый верхний анкер на данном этапе включается в работу конструкции.
- 5 этап: производится установка второго анкера.
- 6 этап: осуществляется конечная разработка котлована на глубину 8,05 м до уровня низа плиты фундамента прижимной стенки. На данном этапе в работу конструкции подключается второй нижний анкер.

Альтернативное конструктивно-технологическое решение

Для реализации цели настоящей статьи рассмотрим альтернативный подход к конструированию подпорного сооружения с учётом действующих нормативных требований Федеративной Республики Германия.

В соответствии с Eurocode 7 и национальным стандартом DIN 1054-2021, угол наклона глубокой поверхности скольжения и угол призмы обрушения определяется в зависимости от угла внутреннего трения грунта. Так же нет особых требований к заглублению сваи в составе подпорной стены в прочные грунты. Эти предпосылки позволяют рассмотреть различные комбинации стены и анкерного усиления в зависимости от принятой глубины заделки сваи.

Определение необходимой длины анкера определяют графическим путем выстраивая рассчитанную призму обрушения и глубокую поверхность скольжения. Проводя из точки анкеровки А прямую под соответствующим углом α (10° – 35°), вплоть до пересечения с линией, обозначающей глубокую поверхность скольжения, определяется точка В пересечения двух этих прямых. Она обозначает центр проектируемого корня анкера (см. Рис. 5). Далее определяется длина самого корня и рассчитывается максимальное сопротивление боковой стенки стержня на стыке стержня и грунта, а также несущая способность самого стержня и общая устойчивость конструкции.

Следует отметить, если глубина заложения свай в грунте, превышает поверхностную длину свай, тогда согласно немецким рекомендациям для гидротехнического строительства, есть возможность сместить плоскость поверхности скольжения вверх на $1/3$ от глубины защемления стенки [14]. Подобное решение позволило бы уменьшить длину применяемых анкеров в первом конструктивном варианте подпорной стенки.

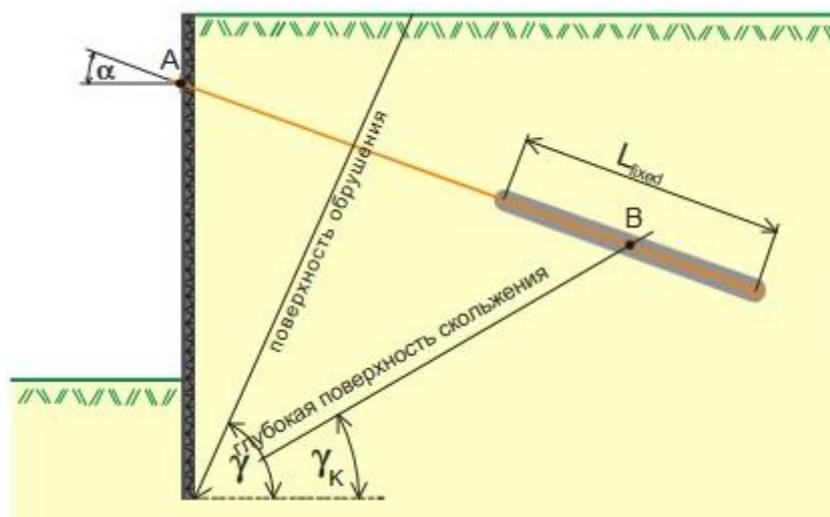


Рис. 5. – Определение длины грунтовых

Учитывая вышеописанное, подбирается такая комбинация длины заделки сваи, чтобы система «ограждение-анкер-грунт» была с адекватным запасом устойчивости и технико-экономическими характеристиками. В ходе итерационных расчётов принята альтернативное техническое решение с уменьшенной глубиной заделки, при этом процесс монтажа остался прежним, но с небольшими корректировками относительно длины буровых свай и анкеров. Принятые конструктивные решения по альтернативному варианту подпорной стены представлены в таблице 3 и на рисунке 6.

Таблица № 6

Альтернативные технические решения по подпорной стенке

Параметр	Единица измерения	Значение
Высота над поверхностью	м	7,00
Глубина заделки	м	6,86
Диаметр сваи	мм	1000
Шаг свай в ряду	мм	2500
Длина верхнего анкера 1	м	14,77
Длина нижнего анкера 2	м	17,75
Угол наклона анкеров	град.	25

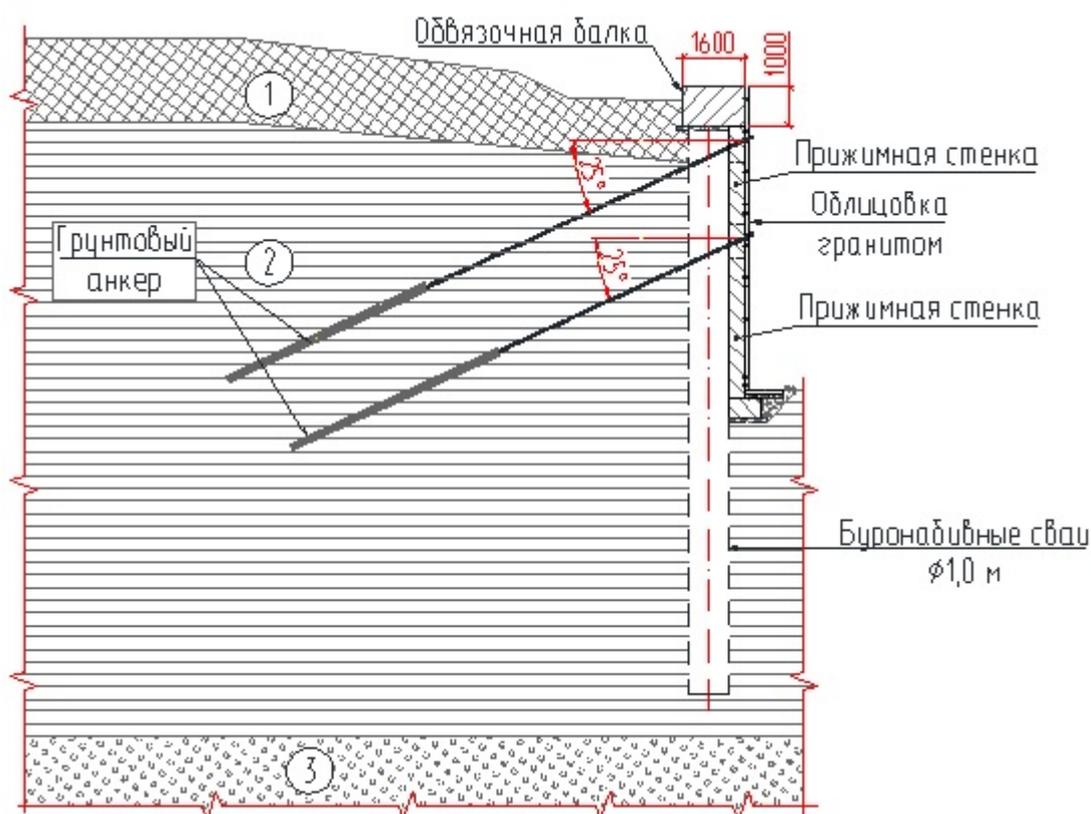


Рис. 6 – Принятое альтернативное техническое решение подпорной стенки

Расчёт и анализ результатов

Характеристики каждого инженерно-геологического элемента, использованные в расчётах, приняты по данным инженерно-геологических изысканий (см. Таблица 1). При этом учтены следующие значения угла трения δ между грунтом и поверхностью подпорной стены:

- ИГЭ-1 – $\delta = 19,30^\circ$;
- ИГЭ-2 – $\delta = 10,70^\circ$;
- ИГЭ-3 – $\delta = 19,30^\circ$;
- ИГЭ-4 – $\delta = 18,00^\circ$;

Расчеты выполнены в программе DC-Baugrube с целью определить устойчивость конструкции, величины усилий в анкерах, построить эпюры изгибающих моментов, поперечных сил и деформаций по глубине.

Визуализация расчетной схемы для первого и альтернативного конструктивного решения показаны на рисунке 7 и 8 соответственно.

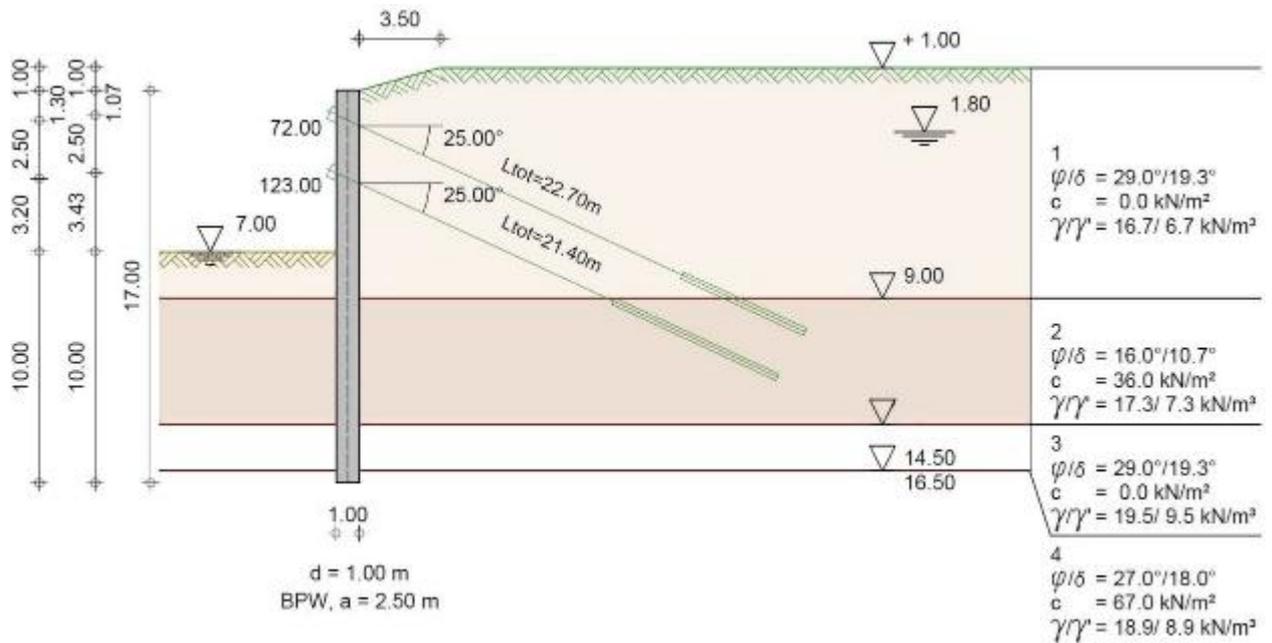


Рисунок 7 – Визуализация расчетной схемы основного конструктивного решения подпорной стенки

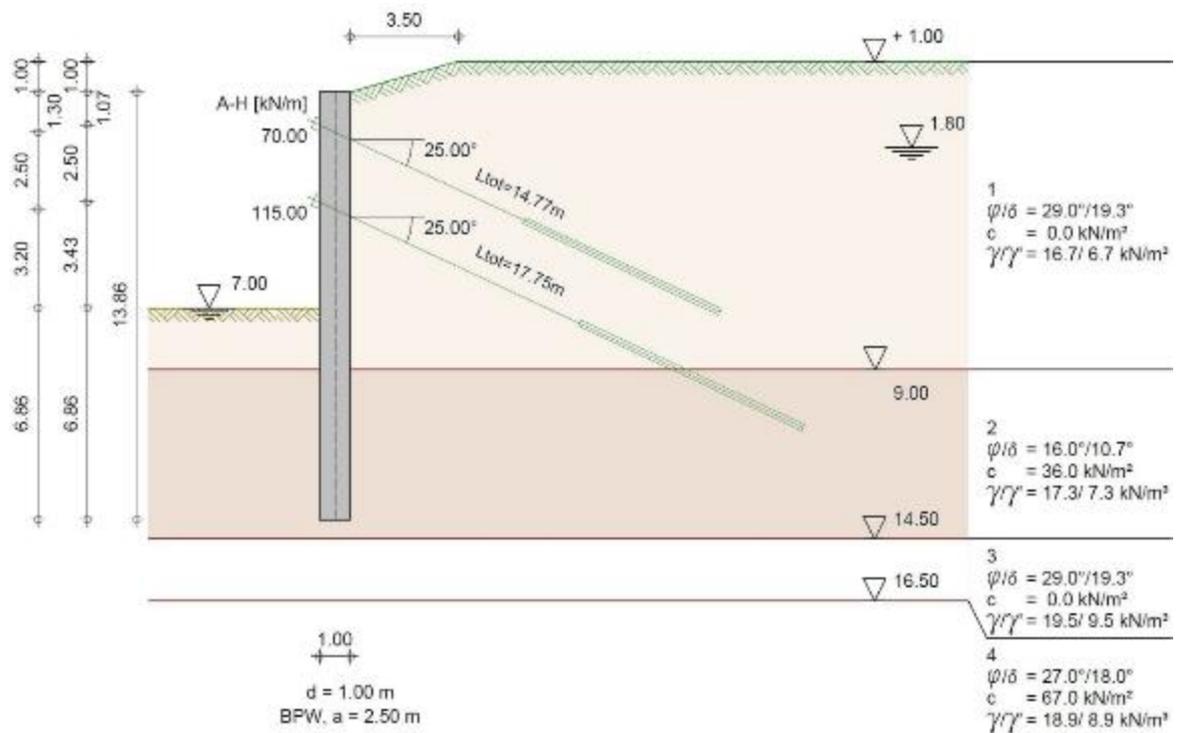


Рисунок 8 – Визуализация расчетной схемы по альтернативному варианту конструктивного решения подпорной стенки

Построенные в ходе расчета эпюры изгибающих моментов, поперечных сил и перемещений приведены для первого и альтернативного конструктивного решения на рисунках 9 и 10 соответственно.

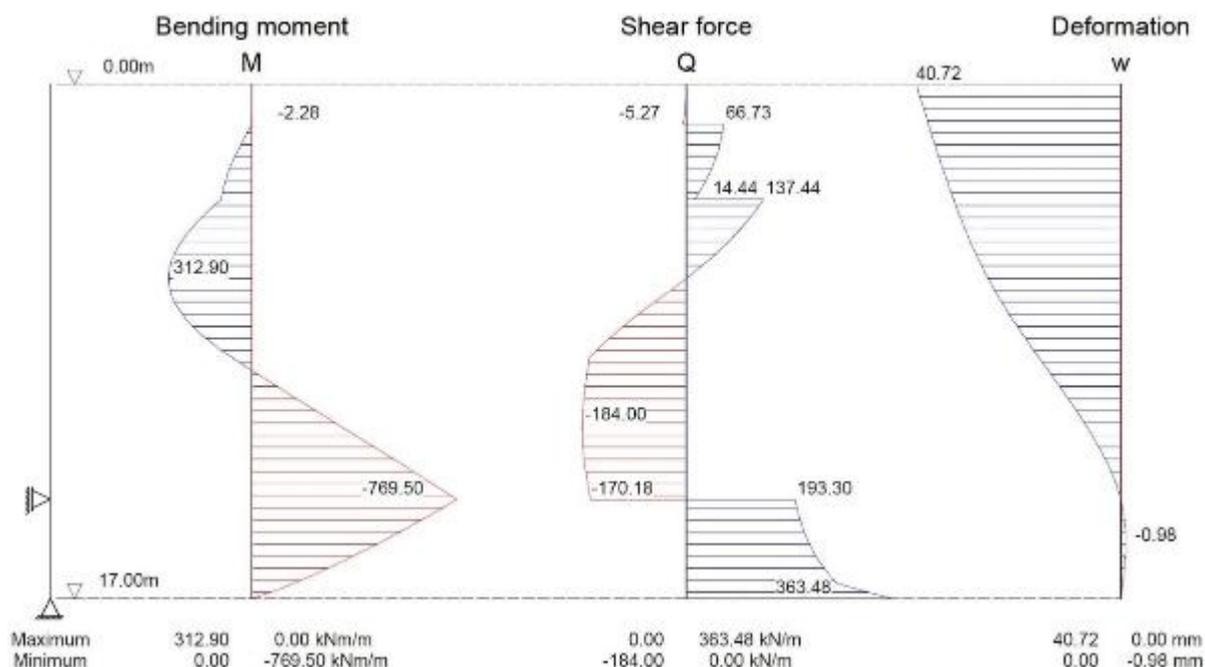


Рис. 9. – Эпюры по результатам расчёта основного конструктивного решения подпорной стенки

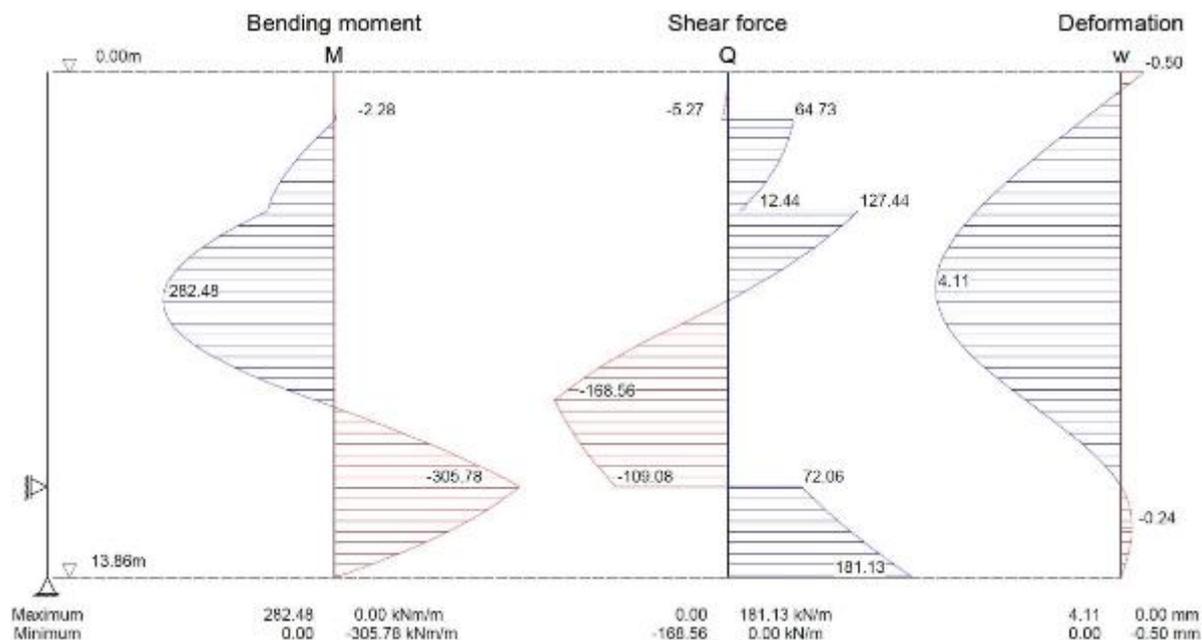


Рис. 10. – Эпюры по результатам расчёта альтернативного конструктивного решения подпорной стенки

Обсуждение и заключения

По результатам исследования сделаны следующие выводы:

Глубина заделки буровой сваи подпорной стены при проектировании по отечественным нормативным документам получилась значительно больше, нежели по немецким нормам. Это связано с требованием п. 8.14 СП 24.1330.2021 заглублять сваю в прочные грунты. А это в свою очередь повлияло на минимальную длину анкеров, т.к. согласно п. 3.1.10 ВСН 506-88 заделку анкеров следует располагать за воображаемой плоскостью, проходящей через низ стенки под углом 45° .

В связи с большей глубиной заделки деформации и максимальные изгибающие моменты получились существенно больше в первом варианте конструктивного решения. Что повлечёт за собой дополнительные затраты по увеличению площади рабочей арматуры буровых свай.

Конструкция подпорной стенки, выполненная по зарубежным нормативным предпосылкам в целом, получилась значительно экономичнее. В значительной мере это связано с отсутствием требования заглублять сваю в составе подпорной стенки в прочные грунты. При этом назначение минимальной требуемой длины анкера зависит от угла внутреннего трения грунта, а не от строго назначенного угла от низа стенки.

Подводя итоги проведённого исследования, можно сделать общий вывод о том, что нужно усовершенствовать нормативные документы, применяя современные расчетные методики из общемировых практик. Но переходить «в слепую» на требования тех же еврокодов не стоит, т.к. в зависимости от регионов данные требования и подходы значительно отличаются. Поэтому необходимо, подтверждать расчетные методики натурными исследованиями и лабораторными испытаниями для местных типов грунтов, и только после этого вносить изменения в нормативную базу.

Литература

1. Гольдштейн М. Н. Оползни и инженерная практика. М.: Трансжелдориздат, 1960. 268 с..
 2. Гинзбург Л. К. Противооползневые удерживающие конструкции. М.: Стройиздат, 1979. 81 с.
 3. Маслов Н.Н. Механика грунтов в практике строительства (оползни и борьба с ними). М.: Стройиздат, 1977. 320 с.
 4. Добров Э. М. Обеспечение устойчивости склонов и откосов в дорожном строительстве с учетом ползучести грунтов. М.: Транспорт, 1975. 216 с.
 5. Браславский В. Д., Львович Ю.М., Грицюк Л. В., Силков В. Р., Добров Э. М. Противооползневые конструкции на автомобильных дорогах. М.: Транспорт, 1985, 301 с.
 6. Далматов Б. И., Бронин В. Н., Карлов В. Д. и др. Механика грунтов. Часть 1. Основы геотехники. М.: Издательство АСВ; СПбГАСУ, 2000. 201 с.
 7. Далматов Б. И., Бронин В. Н., Карлов В. Д. Мангушев Р.А., Сахаров И. И., Сотников С. Н., Улицкий В. М., Фадеев А. Б. Основания и фундаменты. Часть 2. Основы геотехники. М.: Издательство АСВ; СПбГАСУ, 2002. 392 с.
 8. Сорочан Е. А., Трофименков Ю. Г. Справочник проектировщика. Основания, фундаменты и подземные сооружения. М.: Стройиздат, 2011. 470 с.
 9. Kranz E. Uber die Verankerung von Spundwanden. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, 1953. 53 p.
 10. Маковский Л. В. Строительство автодорожных и городских тоннелей: Учебник. М.: РИОР: ИНФРА, 2014. 397 с.
 11. Смородинов М. И. Анкерные устройства в строительстве. М.: Стройиздат, 1983. 183 с.
-

12. Анкера BAUER // БАУЭР Технология: информационно-справочный портал. URL: rusbauer.ru/export/shared/documents/pdf/bst/rus/905_025_6_Der-BAUER-Anker_rus.pdf (дата обращения: 25.11.2022).

13. Sabatini P. J., Pass D. G., Bachus R. C. Ground anchors and anchored systems (№. FHWA-IF-99-015). United States. Federal Highway Administration. Office of Bridge Technology, 1999. 304 p.

14. Recommendations of the Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways: Eau 2012. Ernst & Sohn, 2015. 676 p.

References

1. Gol'dshtejn M. N. Opolzni i inzhenernaja praktika [Landslides and engineering practice]. M.: Transzheldorizdat, 1960. 268 p.

2. Ginzburg L. K. Protivoopolznevye uderzhivajushhie konstrukcii [Landslide containment structures]. M.: Strojizdat, 1979. 81 p.

3. Maslov N. N. Mehanika gruntov v praktike stroitel'stva (opolzni i bor'ba s nimi) [Soil mechanics in construction practice (landslides and their control)]. M.: Strojizdat, 1977. 320 p.

4. Dobrov Je. M. Obespechenie ustojchivosti sklonov i otkosov v dorozhnom stroitel'stve s uchetom polzuchesti gruntov [Ensuring the stability of slopes and slopes in road construction, considering the creep of soils]. M.: Transport, 1975. 216 p.

5. Braslavskij V. D., L'vovich Ju.M., Gricjuk L. V., Silkov V. R., Dobrov Je. M. Protivoopolznevye konstrukcii na avtomobil'nyh dorogah [Landslide protection structures on highway]. M.: Transport, 1985. 301 p.

6. Dalmatov B. I., Bronin V. N., Karlov V. D. i dr. Mehanika gruntov. Chast' 1. Osnovy geotekhniki [Soil mechanics. Part 1. Fundamentals of geotechnics]. M.: Izdatel'stvo ASV; SPbGASU, 2000. 201 p.

7. Dalmatov B. I., Bronin V. N., Karlov V. D. Mangushev R.A., Saharov I. I., Sotnikov S. N., Ulickij V. M., Fadeev A. B. Osnovaniya i fundamenty. Chast' 2.



Osnovy geotekhniki [Foundations and foundations. Part 2. Fundamentals of geotechnics]. M.: Izdatel'stvo ASV; SPbGASU, 2002. 392 p.

8. Sorochan E.A., Trofimenkov Ju.G. Spravochnik proektirovshhika. Osnovaniya, fundamenty i podzemnyye sooruzheniya [Designer's Handbook. Bases, foundations and underground structures]. M: Strojizdat, 2011. 470 p.

9. Kranz E. Uber die Verankerung von Spundwanden. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, 1953. 53 p.

10. Makovskij L. V. Stroitel'stvo avtodorozhnyh i gorodskih tonnelej: Uchebnik [Construction of road and city tunnels: Textbook.]. M.: RIOR: INFRA, 2014. 397 p.

11. Smorodinov M. I. Ankernye ustrojstva v stroitel'stve [Anchor devices in construction]. M.: Strojizdat, 1983. 183 p.

12. Anker BAUER [Anchor BAUER] URL: rusbauer.ru/export/shared/documents/pdf/bst/rus/905_025_6_Der-BAUER-Anker_rus.pdf

13. Sabatini P. J., Pass D. G., Bachus R. C. Ground anchors and anchored systems (№. FHWA-IF-99-015). United States. Federal Highway Administration. Office of Bridge Technology, 1999. 304 p.

14. Recommendations of the Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways: Eau 2012. Ernst & Sohn, 2015. 676 p.