

д.т.н. Должиков П. Н.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина),
д.т.н. Кипко А. Э.
(ВНУ им. В. Даля, г. Антрацит, Украина),
к.т.н. Кирияк К. К.
(ЦНТУ «Инжзащита», г. Ялта, Украина)

ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ УСТРОЙСТВА ПОДПОРНЫХ СТЕН МЕТОДОМ НАПОРНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ НАСЫПНЫХ ГРУНТОВ

Выполнено моделирование устойчивости системы склон-удерживающее сооружение в инженерной программе конечно-элементного анализа Phase2 с учетом закрепления грунта при помощи метода напорной цементации. Определены коэффициенты запаса устойчивости склона с учетом геоморфологических параметров и физико-механических характеристик массива пород по критерию прочности Кулона-Мора.

Ключевые слова: устойчивость склонов, моделирование, напорная цементация, подпорные стены, коэффициент запаса устойчивости.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Масштабное строительство приводит к техногенной дестабилизации геологической среды и активизации опасных экзогенных геологических процессов (ЭГП) в регионах Украины и особенно в Крыму. Значительной проблемой при проектировании является оползнеопасная обстановка большинства участков отводимых под застройку и изменение вертикальной планировки, которая во многих случаях требует значительных перепадов в отметках (глубокая срезка или высокая насыпь). Перепланировка склона в большинстве случаев нарушает баланс масс на склоне и приводит к развитию склоновых гравитационных процессов. Строительство в данных условиях, должно проводиться под прикрытием подпорных стен и сооружений инженерной защиты [1]. Закрепление грунта за подпорными стенами позволит снизить напряжения в удерживающих конструкциях и увеличить устойчивость грунтового массива.

Изучение изменения сцепления, угла внутреннего трения и коэффициента консолидации оползневого суглинка, усиленного методом напорной цементации, выполнено в работе [2]. Проведено числен-

ное моделирование напряженно-деформированного состояния закрепленного лессовидного суглинка методом Jet-Grouting [3]. Конечно-элементный анализ оползневых откосов и противооползневых сооружений с учетом сейсмических воздействий прямым динамическим методом рассмотрен в работе [4]. Значительный интерес представляют работы по анализу геодезического мониторинга эффективности противооползневых мероприятий, позволяющие определять параметры смещений элементов инженерной защиты и склона в пространстве и во времени [5]. Определение параметров для численного моделирования поведения грунтов проводилось Л. А. Строковой из технического университета г. Мюнхен [6].

Для более глубокого изучения геомеханических процессов, имеющих место в усиленном грунтовом массиве при совместной работе с удерживающими сооружениями, практический интерес представляет численное моделирование системы: грунтовый массив – удерживающее сооружение с учетом геоморфологических и геодинамических особенностей на этапах строительства и эксплуатации.

Цель работы – геомеханическое обоснование устройства высоких подпорных

стен при помощи метода напорной цементации и обоснование эффективности применения средств инженерной защиты на основе метода конечных элементов. Для ее достижения поставлены и решены следующие задачи:

1. Проанализировать геомеханическую ситуацию и выполнить оценку устойчивости склона в инженерной программе конечно-элементного анализа Phase2 с учетом геоморфологических особенностей структуры массива пород по критерию Кулона-Мора.

2. Обосновать целесообразность и эффективность инъекционного закрепления грунтов при совместной работе с элементами инженерной защиты.

Методика исследований. В основу статьи положено комплексное исследование участка строительства и прилегающего к нему склона: инженерно-геологические изыскания геоморфологических и гидрогеологических параметров с учетом сложной геодинамической обстановки; численное моделирование и определение устойчивости системы склон-удерживающее сооружение в инженерной программе конечно-элементного анализа Phase2.

Изложение материала и его результаты. Участок строительства находится в юго-восточной части г. Алушка между санаторием «Морской прибой» и Алушкинским парком, занимает центральную и восточную часть территории бывшего санатория «Златоуст». В геоморфологическом отношении исследуемая территория расположена в прибрежной части среднекрутого и крутого оползневого склона преимущественно южной экспозиции. Участок исследований расположен в пределах нижней части Воронцовского оползня в абсолютных отметках 13 - 80 м, застроенного зданиями и сооружениями в конце 70-х годов прошлого века. На момент проведения изысканий все здания в пределах площадки, в основном, разрушены.

Рельеф склона сформирован древними и современными оползневыми и эрозий-

ными процессами, а также сильно изменен в результате хозяйственного освоения территории.

В геологическом строении участка и склона принимают участие два комплекса горных пород. Нижний, являющийся региональным водоупором и фундаментом для верхнего, сложен коренными породами таврической серии, представленными бескарбонатным флишем из переслаивающихся аргиллитов, алевролитов и песчаников. Верхний комплекс, перекрывающий коренные породы таврической серии, представлен четвертичными оползневыми накоплениями состоящих из суглинков с отдельными пачками смещенных пород таврической серии (рис. 1).

В результате проведенных исследований, анализа и обобщения материалов, ранее проведенных инженерногеологических изысканий, были выделены 2 стратиграфогенетических комплекса (СГК) и 4 инженерногеологических элемента (ИГЭ), представленные в табл. 1.

Физико-механические характеристики верхних инженерно-геологических слоев приведены в табл. 2.

Подземные воды в пределах исследуемой территории имеют спорадическое распространение и приурочены к щебенистым и дресвяным разностям оползневых отложений, выветрелой зоне коренных грунтов таврической серии.

В соответствии с действующими ДБН В.1.1-12:2006 и картой ОСР-2004-А, исследуемая территория с 10% вероятностью превышения сейсмической интенсивности в баллах шкалы М8К-64 в течение 50 лет (период повторяемости сотрясений один раз в 500 лет) относится к зоне интенсивности сотрясений на средних грунтах, равной 8-ми баллам.

В ходе анализа плана организации рельефа и разработки мероприятий по инженерной защите здания паркинга и гостиничного комплекса, возникла необходимость устройства удерживающего сооружения со стороны примыкающего склона (рис. 2). Для предотвращения развития

оползневых процессов с северной стороны гостиничного комплекса предусмотрено устройство комбинированного ростверка под ул. Алушкинское шоссе. Южнее по склону устройство комбинированного ростверка в связи с рельефом склона не представляется возможным, следовательно, нагрузка возникающая от обратной засыпки пазухи и от северо-восточного склона, должна восприниматься зданием паркинга. Однако при расчете горизонтальных нагрузок на стену административно-гостиничного комплекса по оси 12 было установлено, что интенсивность активного и оползневого давления значительно превышает заложенную при проектировании. Вертикальная планировка участка, восточнее по склону от оси 12 паркинга, требует перепада в абсолютных отметках от 36,9 м до 50,40 м (см. рис. 1). Исходя из этого, необходимо решить сложную инженерную задачу, обеспечить устойчивость северо-восточного склона, не превышая допустимых нагрузок на паркинг, и запроектировать подпорную стену высотой 13,5 м.

Значительные перепады между отметками естественного и проектного рельефа с южной стороны, обеспечиваются подпорными стенами Ст-1 и Ст-2 расположенными в двух уровнях (см. рис. 1). Засыпка образовавшейся пазухи выполнялась местным суглинком, который после уплотнения создает нагрузки на сооружения в недопустимых пределах за счет низких физико-механических характеристик. Для увеличения сдвиговых и деформационных свойств грунта применялся метод напорной цементации, который показал значительную эффективность при закреплении оползневых суглинков [2]. Технологические параметры инъекции представлены в табл. 3.

Основываясь на экспериментальные и теоретические исследования, выполненные в работе [7], а так же на результаты закрепления грунтов на объектах в схожих условиях, приняты сдвиговые и деформационные характеристики представленные в табл. 2.

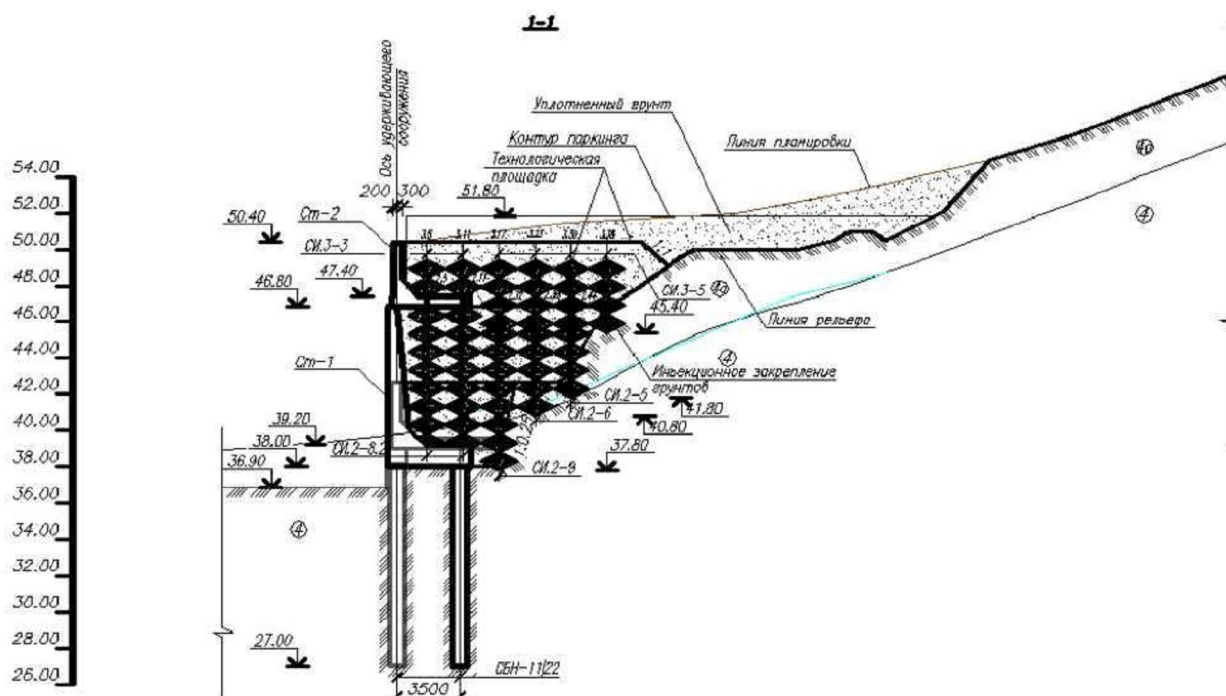


Рисунок 1 – Продольный разрез оползневого склона

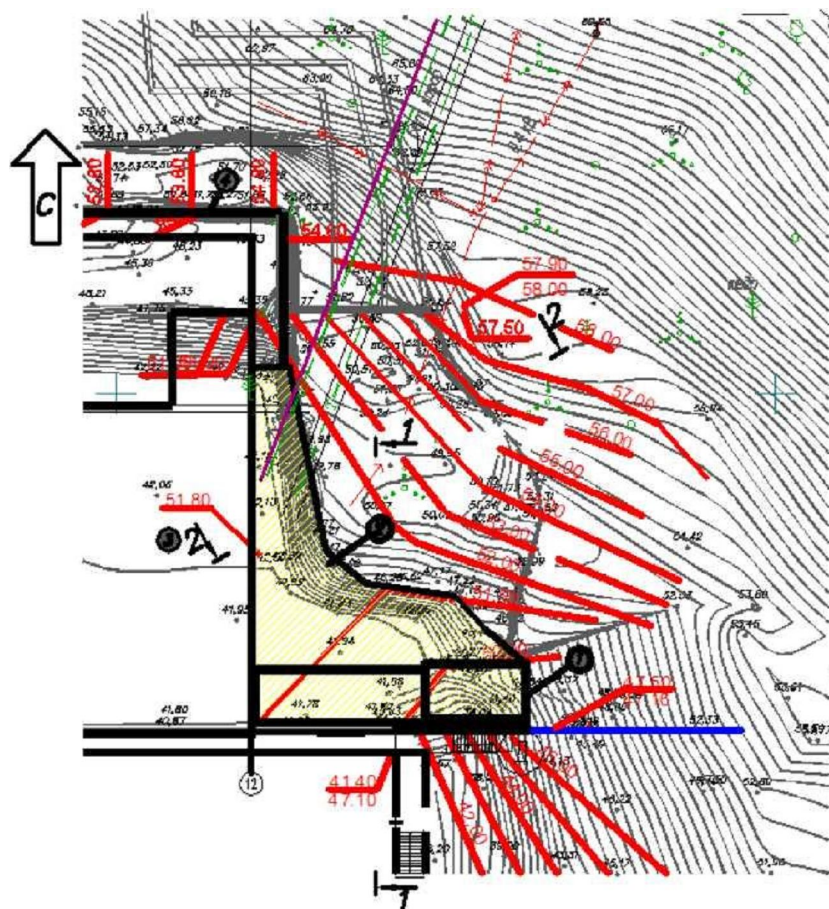
СТРОИТЕЛЬСТВО

Таблица 1 – Инженерно-геологические элементы оползневого склона

№	№ SGK	Наименование грунта по ГОСТ 25100-95	Геологический индекс	№ ИГЭ	Описание
1	SGK-2	Нерасчлененные верхнечетвертично-современные и современные отложения	dpQ ₃₋₄	ИГЭ-2	Суглинки дресвяные серые и темно-серые. Включения представлены аргиллитами, алевролитами, песчаниками, сферосидеритами и известняками. Обломки известняка преимущественно полуокатанные.
			dpQ ₄	ИГЭ-3	Суглинки дресвяные темно-серые, до черных с дресвой и щебнем аргиллитов чешуйчатых, алевролитов, сферосидеритов и песчаников мелкозернистых на кварцевом цементе.
2	SGK-3	Коренные грунты таврической серии	Т ₃ -J ₁	ИГЭ-4а	Аргиллиты интенсивно выветрелые тонкоплитчатые и чешуйчатые, темно-серые, окрашены гидроокислами железа, выветрелые в приповерхностной зоне до состояния суглинков.
				ИГЭ-4	Аргиллиты темно-серые, до черных, дислоцированные, чешуйчатые с прослоями тонкоплитчатых алевролитов и песчаников.

Таблица 2 – Физико-механические характеристики грунтового массива

Наименование инженерно-геологических элементов	Плотность γ , кН/м ³	Сцепление C , МПа	Угол внутреннего трения φ , град	Модуль деформации, МПа
ИГЭ-2 - суглинок со щебнем и дресвой	21,6	0,030	25	66
ИГЭ-3 - суглинок щебенисто дресвяный	22,5	0,030	34	54
ИГЭ-4а - аргиллиты выветрелые	22,1	0,028	27	19
ИГЭ -4 - аргиллиты мелкочешуйчатые	22,5	0,018	38	88
ИГЭ -5 - закрепленный суглинок	20,5	0,016	26	33



1 – контур подпорных стен; 2 – инъекционное закрепление грунтов; 3 – паркинг и гостиничный комплекс; 4 – комбинированный ростверк

Рисунок 2 – План участка строительства

Таблица 3 – Технологические параметры инъекции

Δh_{\max} , м	R_0 , м	L , м	P_3 , МПа	l , м	d , мм	Интервал заходки, м	Количество скважин	Объем на 1 п.м., м ³	Объем раствора, м ³
0,05	2	2	0,6	4-9	112	2-9	135	0,18	198

Для геомеханического обоснования устройства высоких подпорных стен при помощи метода напорной цементации и эффективности применения средств инженерной защиты на основе метода конечных элементов использована инженерная программа конечно-элементного анализа Phase2 версии 8.0 компании Rocscience Inc. (www.rocscience.com).

Программа конечно-элементного анализа Phase2 позволяет моделировать геомеханические процессы, происходящие в грунтовом массиве. В программе также

используется итерационный алгоритм снижения прочностных параметров, путем введения корректирующего (ослабляющего) коэффициента (SRF, Strength Reduction Factor) [8]. Целью расчетов является определение критического значения этого коэффициента (*КСП*), при котором происходит сдвигение массива.

По данным инженерно-геологических изысканий в вышеуказанной инженерной программе заданы геометрические параметры рассматриваемого объекта, профиль которого изображен на рис. 3.

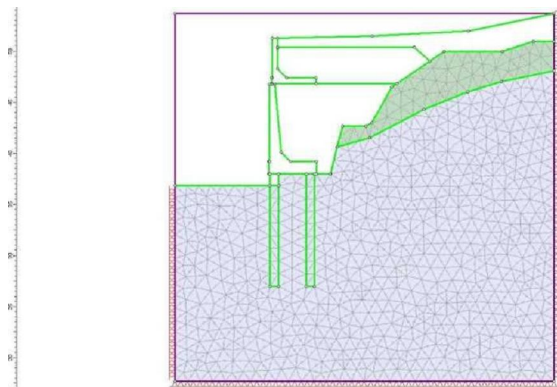


Рисунок 3 – Геометрические параметры склона

Область геометрической модели разбивалась на конечные элементы, а для инженерно-геологических слоев присваивались физико-механические характеристики грунтового массива согласно данным, приведенным в табл. 2. В качестве критерия прочности выбран критерий Кулона-Мора, часто используемый для оценки прочности грунтов и мягких пород.

Для того, чтобы наиболее точно проанализировать поведение грунтового массива и конструкций во времени, смоделировано последовательное возведение удерживающего сооружения и его эксплуатационный период с учетом сейсмического воздействия. Сейсмическое воздействие необходимо учитывать с помощью квазистатической методики, в соответствии с которой сила сейсмического воздействия определяется как динамический коэффициент сейсмичности, получаемый перемножением набора коэффициентов, учитывающих грунтовые условия, ускорение грунта, допустимость разрушений конструкций и т.д. Который для данного случая принимается $\mu = 0,042$.

Последовательность устройства удерживающего сооружения состоит из трех этапов (см. рис. 1, 2):

1. Устройство свай СБН-10 с отметки 38,00, выполнение подпорной стены Ст-1 и стены паркинга по оси 12 до отм. 46,80. Обратная засыпка пазухи местным грунтом (ИГЭ-2, 3) с уплотнением.

2. Устройство уголковой подпорной стены Ст-2 и стены паркинга до отм. 51,80.

Первая очередь инъекционного закрепления грунта засыпки с отм. 46,80.

3. Засыпка грунта до отм. 50,40 и его уплотнение. Вторая очередь закрепления грунта.

Наибольший интерес, представляет работа системы: грунтовый массив – удерживающее сооружение, по окончанию третьего этапа строительства, при сейсмическом воздействии. После выполнения расчетов получены перемещения, главные напряжения, максимальные сдвиговые деформации и *KCF* (*SRF*) представленные на рис. 4-6.

На рис. 4, показаны значения и направления векторов общих перемещений возникающих в конструкциях и грунтовом массиве, при воздействии сейсмических сил. Перемещения в конструкциях находятся в допустимых пределах, значения которых показывают достаточную сходимость при сравнении результатов с другими методами расчета и натурными испытаниями. При моделировании работы свай в ПК Lira 9.6, значения вертикальных перемещений составили 0,016 м, испытание статической нагрузкой 0,011 м, при допустимом перемещении 0,020 м. Горизонтальное смещение верха подпорной стены на свайном основании Ст-1, по отношению к оси свай, составляет 0,072 м, при необходимом выполнении условия $U_{\text{tot}}=h(1/75)$.

Главные напряжения, σ_1 (Sigma 1) и σ_3 (Sigma 3) изображены на рис. 5, исходя из которых выполнялся подбор армирования для удерживающих конструкций. Напряжения находятся в допустимых пределах, армирование не превышает 3%.

Результатом последовательного нагружения модели и итерационных вычислений является определение местонахождения потенциальной поверхности скольжения в грунтовом массиве и зон максимальных сдвиговых деформаций (shear strain), которые вычисляются по формуле:

$$\varepsilon_{\text{max}} = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{2},$$

где ε_1 и ε_3 – наибольшие и наименьшие главные деформации, которые для плоской задачи соответствуют значениям наибольшего и наименьшего напряжений σ_1 и σ_3 .

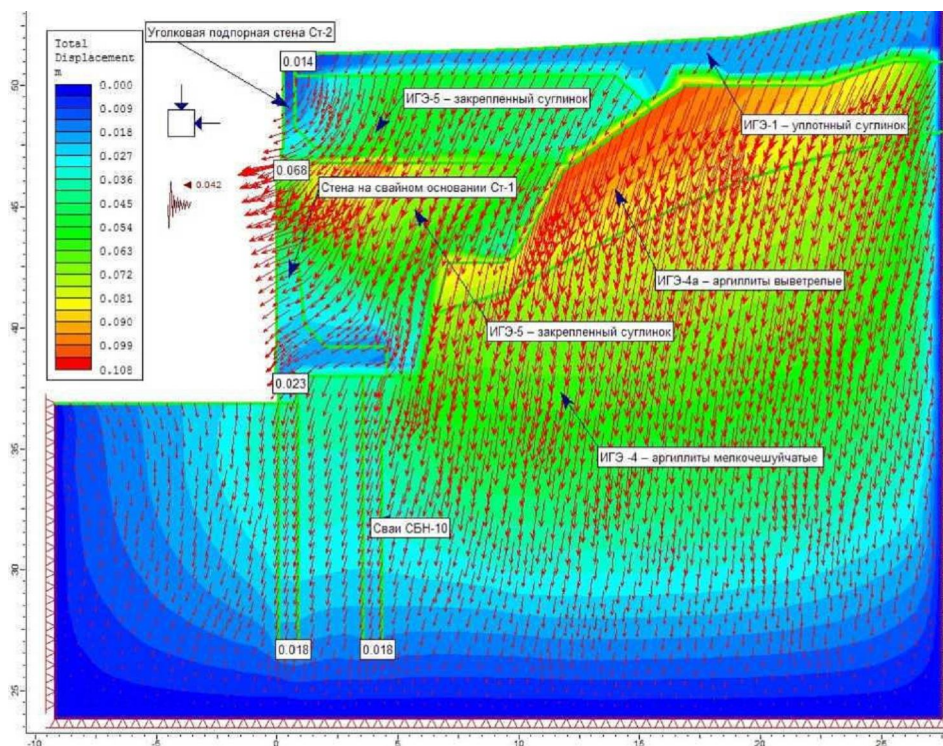


Рисунок 4 – Значения и векторы общих перемещений (Total Displacement) в конструкциях в грунтовом массиве

Для рассмотренной задачи коэффициент запаса устойчивости, при сейсмическом воздействии составил $KСП=1,98$, что отвечает нормативным требованиям [1].

Области с максимальными сдвиговыми деформациями наблюдаются на линии от верха подпорной стены Ст-1 и увеличиваются к её фундаменту, а также приурочены к боковой поверхности свай СБН-10 (рис. 6), значения которых ($\epsilon_{max}=0,32...0,04$) подтверждают необходимый запас прочности грунтового массива.

Также, проводились повторные расчеты по определению нагрузки на стену паркинга по оси 12, с учетом закрепления грунта засыпки методом напорной цементации, значения которой не превышают заложенной при проектировании сооружения

Результаты. Согласно результатам численного моделирования геомеханической устойчивости склона и удерживающих сооружений получены перемещения в

допустимых пределах ($U_{tot} = 0,014...0,072$ м), коэффициент запаса устойчивости элементов инженерной защиты при совместной работе с грунтовым массивом равен 1,98, то есть система находится в устойчивом состоянии. По результатам расчета главных напряжений получены значения, которые использованы для подбора арматуры.

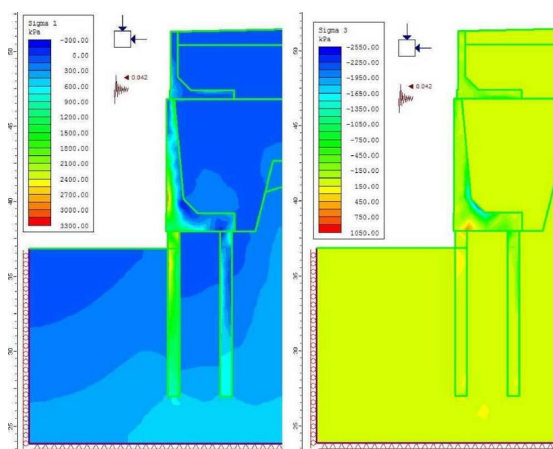


Рисунок 5 – Главные напряжения σ_1 (Sigma 1) и σ_3 (Sigma 3) соответственно

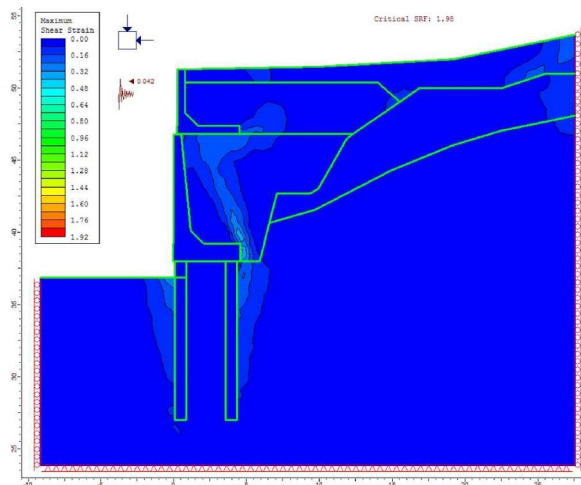


Рисунок 6 – Максимальные сдвиговые деформации (Maximum Shear Strain) и коэффициент снижения прочности (Critical SRF)

Для увеличения сдвиговых и деформационных характеристик грунтового массива применен метод напорной цементации, что позволило уменьшить нагрузку, напряжения и перемещения в конструкциях, обеспечить устойчивость склона при совместной работе с удерживающими сооружениями.

Выводы. Численное моделирование и сравнение результатов расчета дало воз-

можность проанализировать напряженно-деформированное состояние системы: грунтовый массив – удерживающее сооружение, выполненное в программе Phase2, которое показало эффективность применения метода напорной цементации при возведении высоких подпорных стен. Вычисленный коэффициент устойчивости при сейсмическом воздействии находится в нормативных пределах, это дало возможность обосновать принятое инженерное решение и подтвердить его целесообразность.

Таким образом, применение инъекционного закрепления грунта является эффективным методом при устройстве высоких подпорных стен и комбинированных элементов инженерной защиты склона.

Также необходимо отметить, что важнейшим аспектом при применении метода напорной цементации, для стабилизации грунтов является точность определения геометрических и технологических параметров инъекции, качество инженерно-геологических изысканий и полученные геомеханические параметры, которые значительным образом влияют на результаты моделирования.

Библиографический список

1. Державні будівельні норми України. ДБН В.1.1-24:2009. Захист від небезпечних геологічних процесів. Основні положення проектування. Видання офіційне. - К.: Мінрегіонбуд України, 2010. - 50 с.
2. Кіріяк К.К. Обґрунтування технологічних параметрів ін'єкційного закріплення зсувонебезпечних ґрунтових структур : автореф. дис. ... канд. техн. наук. : 05.15.09 / К.К. Кіріяк. – Дніпропетровськ: ДВНЗ Дніпропетр. нац. гірн. унт., 2013. - 17 с.
3. Ларцева І.І. Визначення характеристик міцності ґрунтів, закріплених вертикальними ґрунтоцементними елементами / І.І. Ларцева / Світ ГЕОТЕХНІКИ, 2012. - № 5. - С. 21-26.
4. Егунов К.В. Расчеты оползневых откосов и противооползневых сооружений с учетом сейсмических воздействий прямым динамическим методом / К.В. Егунов, П.А. Устинов // Зб. наук. пр. (будівництво) / Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій». - Вип. 75: в 2-х кн.: Книга 1. – Київ: ДП НДІБК, 2011. - С. 35-40.
5. Зуска А.В. Применения геодезического мониторинга эффективности защитных сооружений и состояния склонов балок с целью предотвращения оползневых процессов / А.В. Зуска, О.Л. Горбатов // Научный вестник Национального горного университета, 2010. - №11-12. - С. 25-32.
6. Строкова Л.А. Определение параметров для численного моделирования поведения грунтов / Л.А. Строкова // Известия Томского политехнического университета. - Томск: ТПУ, 2008. - №1. - С. 69-74.
7. Должиков П.Н. Инъекционная стабилизация оползневых грунтов: монография / [Должиков П.Н., Фурдей П.Г., Кирияк К.К., Рыжикова О.А.]. - Донецк: Світ книги, 2012. - 212 с.

8. Hammah, R.E. *The Shear Strength Reduction Method for the Generalized Hoek-Brown Criterion. American Rock Mechanics Association / [Hammah, R.E., Yacoub, T.E. and Gorkum, B.C., Curran, J.H. (2005)] // Proceedings of the 40th U.S. Symposium on Rock Mechanics: Rock Mechanics for Energy, Mineral and Infrastructure Development in the Northern Regions, Alaska, Anchorage. - P. 255-260.*

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Борзыхом А. Ф.

Статья поступила в редакцию 14.10.13.

д.т.н. Должиков П. М. (ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна), д.т.н. Кіпко О. Е. (СНУ ім. В. Даля, м. Антрацит, Україна), к.т.н. Кіріяк К. К. (ЦНТУ «Інжзахист», м. Ялта, Україна)

ГЕОМЕХАНІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ УСТРОЮ ПІДПІРНИХ СТІН ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ НАПІРНОЇ ЦЕМЕНТАЦІЇ

Виконано моделювання стійкості системи схил - утримуюча споруда в інженерній програмі кінцево-елементного аналізу Phase2 з урахуванням закріплення ґрунту за допомогою методу напірної цементациї. Визначено коефіцієнти запасу стійкості схилу з урахуванням геоморфологічних параметрів і фізико-механічних характеристик масиву порід за критерієм міцності Кулона-Мора.

Ключові слова: стійкість схилу, моделювання, напірна цементация, підпірні стіни, коефіцієнт запасу стійкості.

Dolzhikov P. N. (DonSTU, Alchevsk, Ukraine), Kipko A. E. (VNU them Dahl, Anthracit, Ukraine), Kirijak K. K. (CSTS «Engprotection», Yalta, Ukraine)

GEOMECHANICAL SUBSTANTIATION DEVICE RETAINING WALLS BY PRESSURE CEMENTATION BACKFILL SOIL

Performed modeling of the steadiness of the system slope-retaining structure in the engineering program, finite element analysis Phase2 with the consolidation of soil by the method pressure cementation. Determined the coefficients of the reserve steadiness of the slope with the geomorphologic parameters and physical-mechanical properties of the rock by the Mohr-Coulomb strength.

Key words: slope stability, modeling, pressure cementation, retaining walls, coefficient of the reserve steadiness.