

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТОВЫХ ОТКОСОВ МЕТОДОМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ПК "ЛИРА"

Николай Савицкий, Анна Гуслистая

Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры

1. Введение

В настоящее время существует большое количество различных методов оценки устойчивости склонов и откосов и их классификаций [1, 7, 11]. Однако среди них можно выделить две основные группы методов:

1) Методы непосредственного расчета коэффициента устойчивости склона

При этом показателем степени устойчивости склона служит коэффициент устойчивости, характеризующий отношение сил (моментов), удерживающих $M_{уд}$ и опрокидывающих $M_{опр}$ рассматриваемый объем грунта, полагая, что оползневый массив жестко смещается по круглоцилиндрической поверхности скольжения, т. е.

$$\eta_y = M_{уд} / M_{опр} . \quad (1)$$

В качестве критерия оценки устойчивости используется его допустимое значение, принимаемое в соответствии с требованиями нормативных документов [10].

Недостатки данного метода:

- не удовлетворяет всем трем уравнениям равновесия, т. е. не учитывает взаимное влияние отдельных секций и их деформируемость в процессе обрушения [11];
- предполагает наличие заранее заданной круглоцилиндрической поверхности скольжения;
- часто приводит к завышению коэффициентов устойчивости даже в тех случаях, когда откос неустойчив [4].

2) Методы, основанные на анализе напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтового массива

При этом в качестве критерия для оценки состояния склона рассматривается отношение напряжений или деформаций в любой точке массива к предельному их значению, т. е. оценивается запас прочности грунта в любой точке рассматриваемого массива [9, 11]. Так, например, для оценки запаса прочности грунтов в массиве по напряжениям можно использовать коэффициент запаса прочности грунта:

$$\eta_n = (\sigma_\alpha \operatorname{tg} \varphi + c) / \tau_\alpha , \quad (2)$$

где σ_α , τ_α - соответственно нормальные и касательные напряжения по элементарным площадкам линии скольжения.

В практических расчетах эти методы сегодня почти не используются. Это обусловлено их малой изученностью, а также сложностью расчета. Существовавшие до настоящего времени способы определения распределения напряжений в склонах были недостаточно совершенны для полного использования широких возможностей этого метода прогноза, поскольку все они предусматривали только упругое состояние грунтового массива, а не упруго-пластическое, которое всегда предшествует возникновению оползня.

В настоящее время в связи со строительством в сложных геологических условиях [3, 6, 8] встает более сложная задача. Сейчас все чаще требуется определить не только степень

устойчивости склонов, но и количественно оценить величины смещений грунтовых массивов [2]. Эти требования поставили задачу определения напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтов массива, взаимодействующего с сооружениями.

2. Разработка расчетной модели грунтового массива

Применение МКЭ значительно упростило задачу определения напряжений в грунте с учетом перераспределения напряжений в результате пластических деформаций.

Так, например, основанный на МКЭ ПК "Лира" (версия 9.0) позволяет исследовать плоскую деформацию грунтов, моделируя грунтовый массив физически нелинейными грунтовыми конечными элементами (в составе библиотеки конечных элементов нелинейный грунтовый элемент имеет номера 281 – 283). Учет специфики грунтов при этом производится на основании зависимости Кулона-Мора для максимального касательного напряжения [5]:

$$\sigma_1 - \sigma_2 \leq -\sin(\varphi) \cdot (\sigma_1 + \sigma_2) + 2c \cdot \cos(\varphi), \quad (3)$$

где $\sigma_1 \geq \sigma_2$ – главные напряжения, c – сдвиговое сцепление, φ – угол внутреннего трения. Расчет производится шагово-итерационным методом, что позволяет учитывать перераспределение напряжений вследствие пластических деформаций грунта.

Таким образом, в результате расчета можно получить значения напряжений и перемещений в любой точке грунтового массива и с помощью этих данных оценить устойчивость склона (откоса), а также определить возможную поверхность скольжения.

Целью проведенной работы было определение устойчивости и НДС грунтового откоса методом численного моделирования в ПК "Лира".

Моделировался вертикальный грунтовый откос. При этом были приняты следующие условия:

1) однородный грунт с характеристиками:

модуль деформации $E=20000 \text{ т/м}^2$; коэффициент Пуассона $\nu=0,2$; удельный вес $\rho=1,8 \text{ т/м}^3$; удельное сцепление $c=2 \text{ т/м}^2$; угол внутреннего трения $\varphi=25^\circ$;

2) условия закрепления:

по вертикальным боковым граням вырезанного массива запрещены горизонтальные перемещения;

по нижней горизонтальной грани вырезанного массива запрещены вертикальные перемещения;

3) в качестве нагрузки принимался собственный вес грунта.

Размер области моделирования выбирался таким образом, чтобы потенциально возможная зона оползания находилась в пределах моделируемой области.

Наибольшую трудность при исследовании вызывал вопрос выбора размера конечных элементов. Он варьировался в пределах от 2 до 0,5 м. При этом для фиксированных точек грунтового массива (рис. 1) сравнивались получаемые при одинаковой нагрузке значения напряжений и деформаций. Анализ НДС грунтового откоса при различной густоте сетки КЭ показал следующее:

1) в тех точках массива, которые теоретически должны оставаться устойчивыми, напряжения и деформации постоянны при любом размере КЭ;

2) в неустойчивых областях при измельчении сетки КЭ наблюдается увеличение в несколько раз напряжений и деформаций. Причем, чем мельче сетка КЭ, тем четче можно определить зону оползания и линию скольжения.

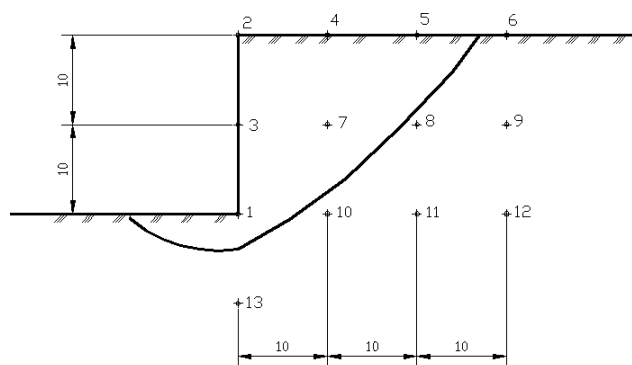


Рис. 1. Схема расположения контрольных точек грунтового массива
(размеры указаны в метрах)

В качестве примера в таблице 1 приведены значения перемещений точек грунтового массива при изменении размеров КЭ.

Таблица 1

Значения перемещений в мм по осям x и z при различных размерах КЭ

№ точки	оси	Размер КЭ		
		2 м	1 м	0,5 м
1	x	-58,772	-176,393	-652,22
	z	-45,4115	-53,0258	-79,5028
2	x	-429,508	-1708,54	-6935,06
	z	-402,428	-1410,94	-5569,62
3	x	-338,748	-1305,02	-5241,57
	z	-225,73	-726,376	-2760,96
4	x	-159,079	-645,138	-2617,45
	z	-216,333	-623,619	-2280,81
5	x	-26,4449	-121,462	-502,645
	z	-112,437	-174,144	-404,774
6	x	2,01291	0,38707	-6,56638
	z	-102,442	-102,91	-104,754
7	x	-71,2003	-257,4	-1011,72
	z	-116,619	-237,831	-725,291
8	x	-3,16998	-4,09815	-9,07525
	z	-89,3137	-89,5602	-92,3827
9	x	-2,67397	-2,31893	-1,88457
	z	-98,5895	-98,5522	-98,5281
10	x	-16,973	-15,8841	-15,0428
	z	-58,0004	-57,5314	-57,1569
11	x	-14,2873	-13,9985	-13,7237
	z	-75,0574	-75,0096	-74,8922
12	x	-9,07396	-9,04773	-8,75219
	z	-84,4082	-84,306	-84,2869
13	x	-26,3421	-26,3887	-26,4308
	z	-28,0888	-27,8333	-27,6229

Это можно объяснить принципом работы физически нелинейных грунтовых элементов: исключение из работы тех элементов, в которых касательные напряжения достигают предельно допустимых значений. При этом берется величина напряжения в центре тяжести элемента, как среднее по всей площади КЭ. Например, в КЭ №1 (рис. 2) напряжения в некоторой области (заштрихованной) уже достигли предельных значений, однако средняя величина напряжений в КЭ №1 меньше предельной, то есть элемент продолжает работать. При более мелкой сетке КЭ в данном случае будут продолжать работать только элементы №№ 2 – 4, а КЭ №5 выключается из работы и таким образом вызывает перераспределение напряжений в массиве.

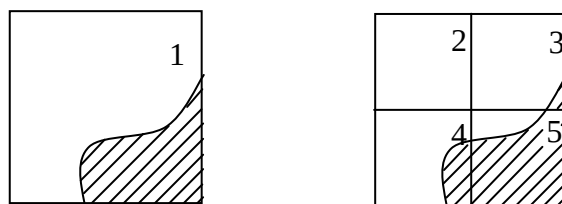


Рис. 2. К объяснению принципа работы физически нелинейных грунтовых элементов

Отсюда можно сделать вывод, что при моделировании грунтовыми КЭ, измельчение сетки влияет на результаты расчета только для тех участков грунтового массива, в которых наблюдаются пластические деформации и, следовательно, возникают очень большие перемещения, не предусмотренные для данного типа КЭ (геометрическая нелинейность не предусмотрена). Объем задачи при измельчении сетки КЭ неоправданно увеличивается. Зависимость объема задачи и, следовательно, времени расчета от размера конечных элементов представлена в таблице 2.

Таблица 2

Изменение объема задачи в зависимости
от количества конечных элементов

Размер КЭ	2 м	1 м	0,5 м
Характеристики расчетной схемы:			
Количество уравнений	1962	7855	30168
Количество элементов	620	2550	9920
Количество узлов	678	2666	10149
Расчет шагово-итерационный			
Виртуальная память, М	4 – 5	4 – 5	6 – 7
Дисковая память, М	1,657	7,574	43,766
Время расчета, мин	2 – 3	14 – 16	24 – 28

Установлено, что наиболее приемлемым и дающим удовлетворительные результаты является размер элемента около 1 м. Однако для получения более точного результата нужно промоделировать задачу 2 – 3 раза при различных размерах КЭ, чтобы более точно установить зону оползания.

В результате данного исследования получены изополя горизонтальных и вертикальных перемещений грунтового откоса (рис. 3, 4). Кроме того векторы направления перемещений каждой точки грунта (рис. 5) позволяют судить о самом механизме оползневого процесса.

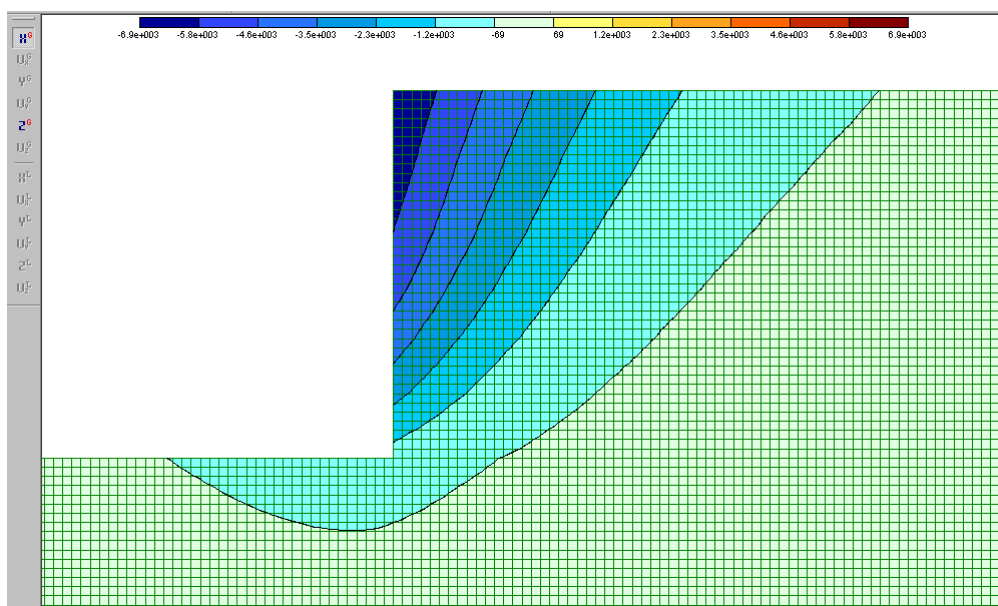


Рис. 3. Изополя горизонтальных перемещений

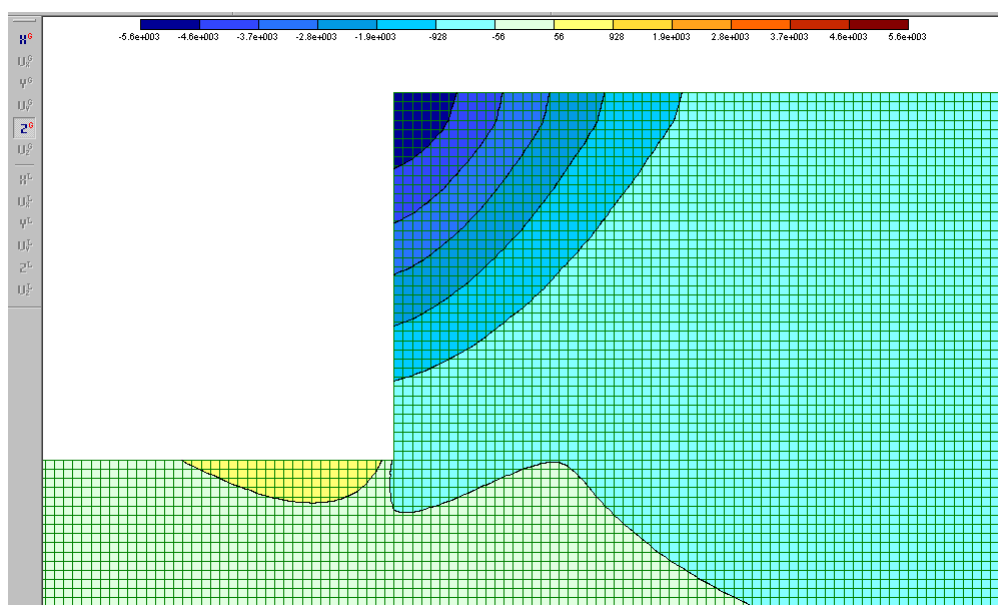


Рис. 4. Изополя вертикальных перемещений

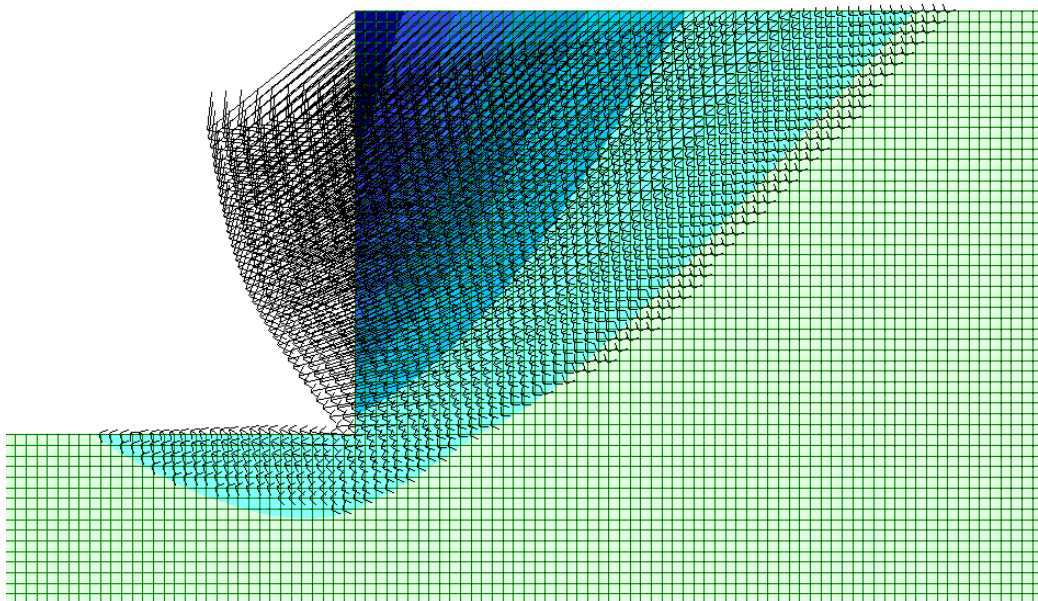


Рис. 5. Векторы направлений перемещений точек грунтового массива

3. Тестирование расчетной модели грунтового откоса и сравнение результатов.

В процессе тестирования расчетной модели проверялось следующее:

- 1) значения напряжений в некоторых точках массива

Значения напряжений, полученные с помощью ПК "Ли́ра", сравнивались со значениями, посчитанными теоретически. При этом разница в результатах не превышала 0,5 %.

- 2) расположение кривой скольжения

Результаты сравнения кривых скольжения, полученных различными методами, представлены на рис. 6.

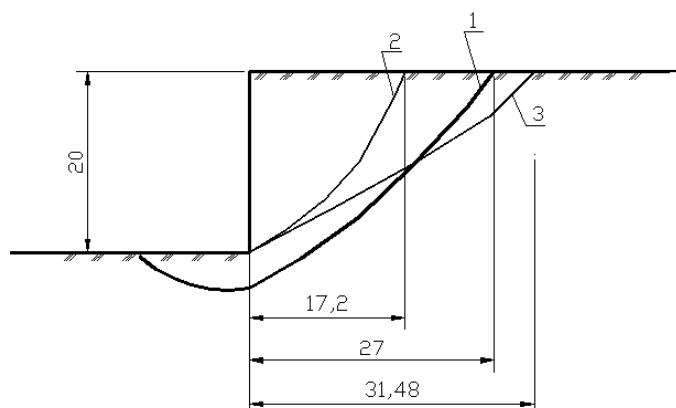


Рис. 6. Сопоставление результатов расчета устойчивости различными методами:
1 – метод численного моделирования в ПК «Ли́ра», 2 – МКЦП, 3 – метод F_p Маслова
(размеры указаны в метрах)

Кривая скольжения, полученная с помощью ПК "Лира", сравнивалась с кривой скольжения, полученной методом кругло-цилиндрической поверхности скольжения (МКЦП). Установлено, что МКЦП значительно завышает значения устойчивости (откос, устойчивый по МКЦП, в действительности неустойчив). Кроме того расчет устойчивости был проведен по методу равнопрочного откоса F_p Маслова (расхождение составляет около 10 %).

4. Выводы

1. Изучены и проанализированы методы оценки устойчивости грунтовых склонов и откосов. Установлена перспективность применения метода, основанного на определении НДС грунтового массива при решении задач взаимодействия сооружений с грунтом.
2. Определены особенности моделирования с помощью физически нелинейных грунтовых элементов.
3. Получены изополя перемещений и напряжений, а также определена поверхность скольжения.
4. Решены тестовые задачи, доказывающие достоверность полученных результатов.
5. Выделены следующие преимущества исследуемого метода:
 - отсутствие необходимости заранее задавать предполагаемую поверхность скольжения;
 - точность получаемых решений [4, 12];
 - возможность анализа взаимодействия подпорных сооружений с грунтовым массивом.

Литература

- [1]. Геологические закономерности и взаимообусловленность развития оползней, обвалов и селевых потоков в горно-складчатых областях – основа прогноза и борьбы с ними: Материалы симпозиума, г. Душанбе, 22 – 26 сентября 1975 г. Выпуск первый. – М.: Изд-во МГУ, 1976. – 144 с.
- [2]. Зарецкий Ю.К. Обеспечение устойчивости склонов и откосов (Герсевановские чтения) // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2001. - №6. – С. 2 – 6.
- [3]. Инновационная стратегия разработки энергоэффективных противооползневых сооружений в г. Днепропетровске / И.И. Куличенко, Н.В. Савицкий, В.И. Большаков, В.П. Козинец // Сб. науч. тр.: Строительство. Материаловедение. Машиностроение. – Вып. №15. –Днепропетровск: ПГАСиА, Gaudeamus, 2001. – С. 5 – 13.
- [4]. Методические рекомендации по расчету устойчивости земляных сооружений и оползневых склонов при статических нагрузках / НИИСК. – К., 1985. – 40 с.
- [5]. ПК ЛИРА, версия 9. Программный комплекс для расчета и проектирования конструкций. Справочно-теоретическое пособие / Под ред. А.С. Городецкого. – К. – М.: "Факт", 2003. – 464 с.: ил.
- [6]. Предложения по комплексу противооползневых сооружений, размещаемому на двухпрофильных склонах (КПОС-2) / Куличенко И.И., Савицкий Н.В., Большаков В.И., Козинец В.П., Сысоев С.Ю., Никифоров Ю.Н. // Сб. науч. тр.: Строительство. Материаловедение. Машиностроение. – Вып. №19. –Днепропетровск: ПГАСиА, Gaudeamus, 2002. – С. 17 – 21.
- [7]. Противооползневые конструкции на автомобильных дорогах / В.Д. Браславский, Ю.М. Львович, Л.В. Грицюк и др. – М: Транспорт, 301 с.
- [8]. Разработка технических предложений по комплексу противооползневых сооружений, размещаемому на однопрофильных склонах (КПОС-1) / / Куличенко И.И, Савицкий Н.В, Большаков В.И., Козинец В.П., Никифоров Ю.Н. // Сб. науч. тр.: Строительство.

Материаловедение. Машиностроение. – Вып. №16. –Днепропетровск: ПГАСиА, Gaudeamus, 2002. – С. 5 – 8.

[9]. Руководство по проектированию зданий и сооружений на подрабатываемых территориях. Ч. III. Башенные, транспортные и заглубленные сооружения, трубопроводы / Донецкий ПромстройНИИпроект, НИИСК Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, 1986. – 225 с.

[10]. СНиП 2.01.15-90. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения проектирования / Госстрой СССР. – М.: Арендное производственное предприятие ЦИТП, 1991. – 32 с.

[11]. Тер-Мартirosян З.Г. Прогноз механических процессов в массивах многофазных грунтов. – М.: Недра, 1986. – 292 .: ил

[12]. Ухов С.Б. Расчет сооружений и оснований методом конечных элементов. Учеб. пособие. – М., 1973. – 118 с. с черт.

SOIL SLOPE STABILITY ESTIMATION BY THE NUMERICAL SIMULATION METHOD USING COMPUTER SOFTWARE "LIRA"

Nikolay Savitsky, Anna Guslistaya

Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture

The article is devoted to the soil slope stability estimation by the numerical simulation method. This method is based on the definition of the stress-strain state of soil massif. The analysis was conducted by using computer software LIRA (version 9.0) based on finite element method (FEM). Physically nonlinear soil finite elements (FE) of 2D problem have been used. These elements work on plane strain scheme according to Coulomb's law. Nonlinear behavior of soil is taken into account by means of nonlinear step-type analysis. The analytical treatment of results has permitted to determine the main features of numerical simulation of soil slopes. Displacement and stress contour plots as well as nodal displacement vector have been obtained. The surface of sliding established by numerical simulation has been compared with one obtained by the conventional methods.