

УДК 624.154

А.Б. Пономарев, А.Л. Новодзинский

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ОПОЛЗНЕОПАСНОГО СКЛОНА В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

Выполнен анализ устойчивости склона в одном из районов г. Перми с использованием математического аппарата МКЭ, также осуществлено сравнение результатов расчетов со значениями, полученными известными аналитическими методами.

Ключевые слова: откос, расчет устойчивости, метод конечных элементов, метод круглоцилиндрических поверхностей.

Анализ устойчивости склонов и откосов является весьма важной задачей гражданского и промышленного строительства. Это особенно актуально для г. Перми, где большое количество жилых домов построено вдоль бровок оврагов, склонов долины рек Данилиха и Егошиха, откосов выемки Транссибирской магистрали.

В настоящее время для оценки устойчивости откосов широкое распространение получили программные комплексы, основанные на методе конечных элементов (МКЭ). Для обоснованности применения МКЭ в решении задач устойчивости откосов был выполнен анализ устойчивости склона в жилом районе г. Перми с использованием МКЭ и сравнение полученных результатов с традиционными методами круглоцилиндрических поверхностей скольжения.

В геоморфологическом отношении рассматриваемый участок приурочен к IV левобережной надпойменной террасе р. Камы, осложненной долиной р. Малая Язовая. Угол падения склона – от 15 до 30°.

По результатам инженерно-геологических изысканий на изучаемом участке выделены следующие инженерно-геологические элементы (ИГЭ), слагающие площадку строительства (сверху вниз):

- ИГЭ-1. Глина полутвердая и твердая, с редким гравием.

- ИГЭ-2. Гравийный грунт с песчаным и суглинистым заполнителем.

ИГЭ-3. Глина элювиальная полутвердая и твердая, с дресвой и щебнем.

ИГЭ-3а. Дресвяный грунт с глинистым заполнителем.

ИГЭ-3б. Суглинок элювиальный твердый, с редкими дресвой и щебнем.

ИГЭ-4. Аргиллит сильновыветрелый с прослоями песчаника сильновыветрелого и алевролита сильновыветрелого.

В период проведения инженерно-геологических изысканий на рассматриваемом участке встречены трещинно-грунтовые воды на глубине ≈ 15 м.

Численный анализ устойчивости склона был выполнен с использованием программного комплекса PLAXIS, реализующего метод конечных элементов в перемещениях. Расчетный комплекс PLAXIS ориентирован на решение сложных геотехнических задач, возникающих на этапах строительства, эксплуатации и реконструкции сооружения и представляет собой пакет прикладных вычислительных программ для конечно-элементного анализа напряженно-деформированного состояния системы основание–фундамент–сооружение.

При создании геометрической модели грунтовый массив разбивался на 15-узловые треугольные изопараметрические конечные элементы, в которых перемещения определяются во всех 15 узлах, а напряжения – в 12 точках. Для моделирования работы грунта под нагрузкой была использована упругопластическая модель Кулона–Мора, которая включает в себя пять основных исходных параметров: модуль Юнга E ; коэффициент Пуассона ν ; угол внутреннего трения φ ; сцепление c ; угол дилатансии (угол увеличения объема грунта при увлажнении) ψ .

При оценке общей устойчивости склона пользуются коэффициентом общей устойчивости, который может определяться как отношение фактической прочности грунта на сдвиг к прочности на сдвиг в предельном состоянии. Если в качестве условия предельного равновесия принято условие прочности Кулона–Мора, то коэффициент общей устойчивости определяется выражением

$$\xi = \frac{c + \sigma_n \tan \varphi}{c_r + \sigma_n \tan \varphi_r}, \quad (1)$$

где c и φ – прочностные характеристики грунтов в основании; σ_n – фактическое нормальное напряжение; c_r и φ_r – значения прочностных характеристик грунтов в предельном состоянии.

Для оценки общей устойчивости в PLAXIS реализован метод *Phi-c-reduction* (снижение φ , c), при котором выполняется пропорциональное снижение прочностных характеристик до тех пор, пока не произойдет разрушение. Устойчивость при этом определяется коэффициентом

$$\sum M_{sf} = \frac{c}{c_r} = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_r}. \quad (2)$$

Расчетная конечно-элементная схема откоса приведена на рис. 1. Графически результаты расчета представлены на рис. 2–7.

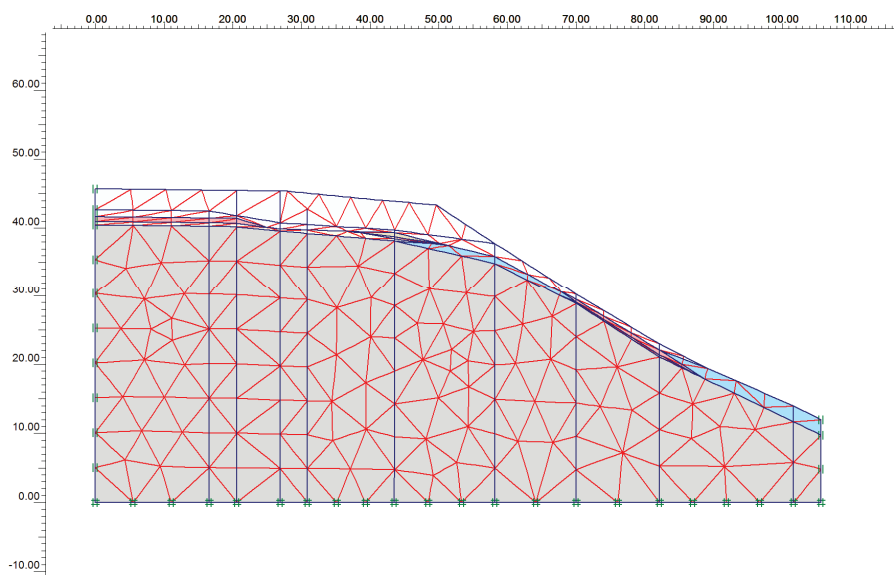


Рис. 1. Расчетная конечно-элементная схема склона

Как показали выполненные расчеты, коэффициент устойчивости откоса по выбранному сечению составляет $\sum M_{sf} = 0,9998$. Возможная поверхность скольжения близка к круглоцилиндрическому очертанию с радиусом 77,58 м с координатами центра скольжения $X_o = 85,28$ м; $Y_o = 86,54$ м.

Также был выполнен расчет устойчивости откоса по круглоцилиндрическим поверхностям скольжения.

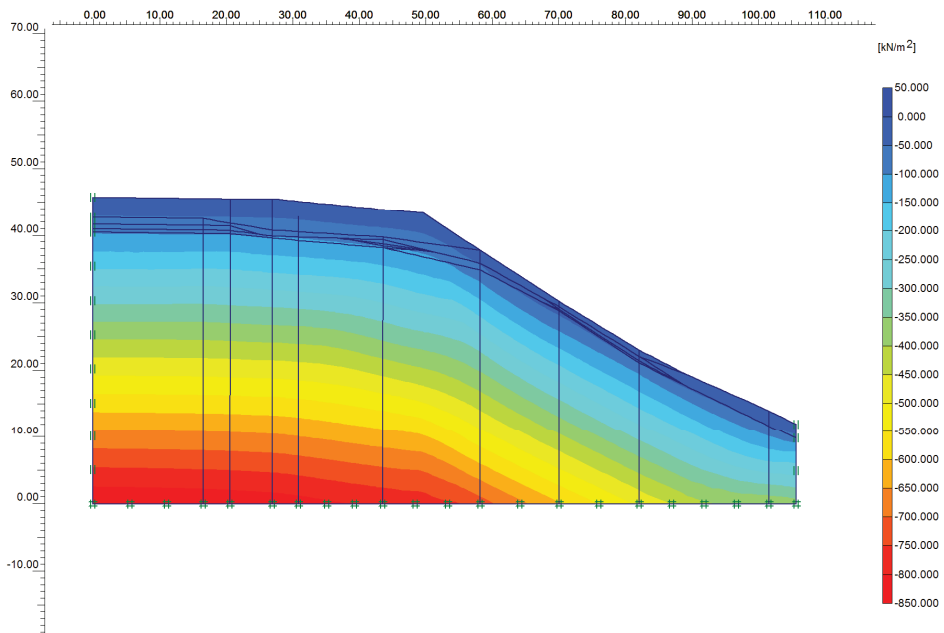


Рис. 2. Изополя нормальных вертикальных напряжений σ_y , кПа

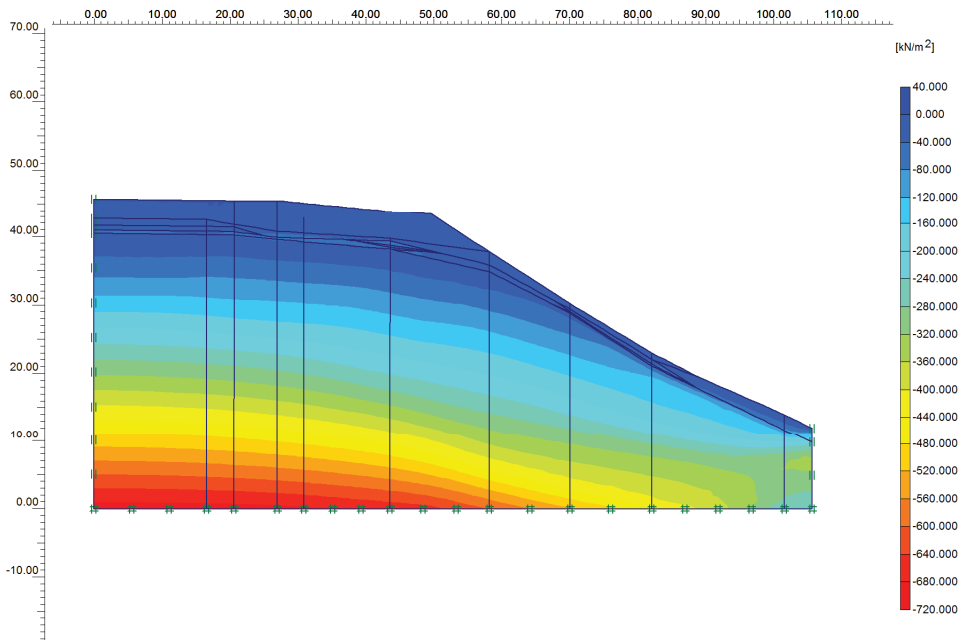


Рис. 3. Изополя нормальных горизонтальных напряжений σ_x , кПа

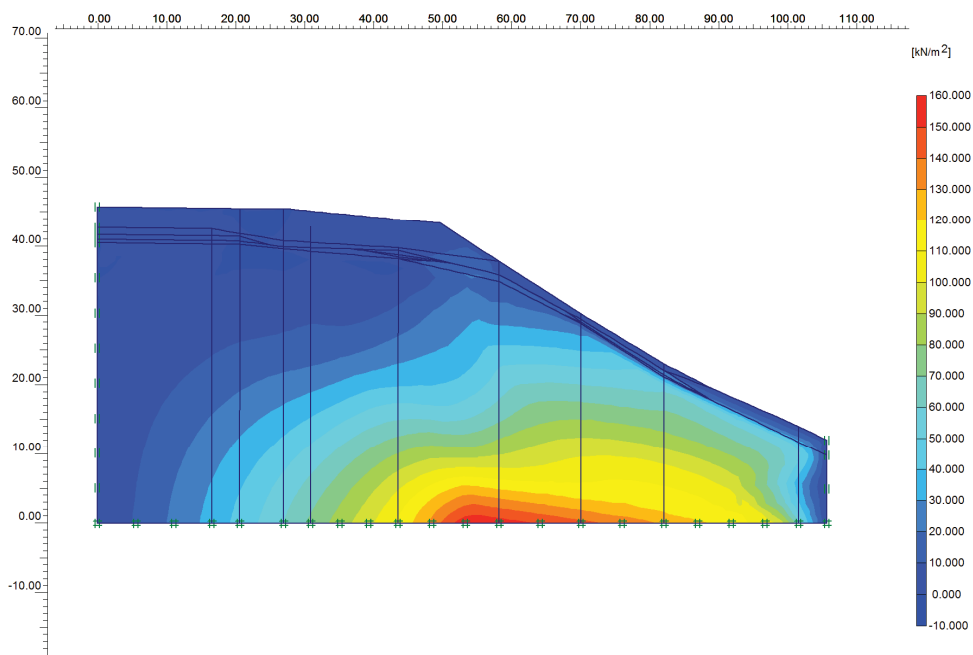


Рис. 4. Изополя касательных напряжений τ , кПа

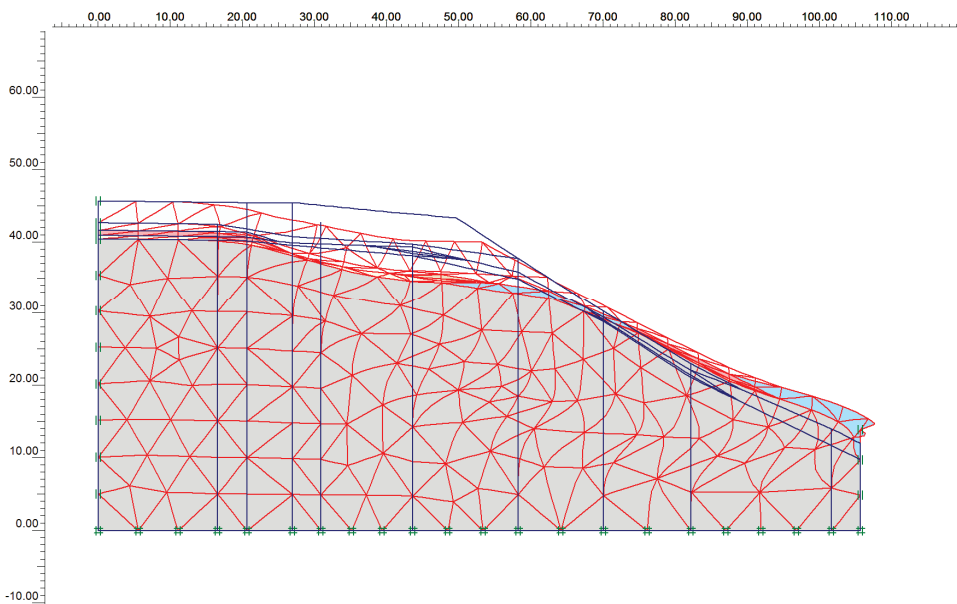


Рис. 5. Деформированная схема склона при возможном оползне

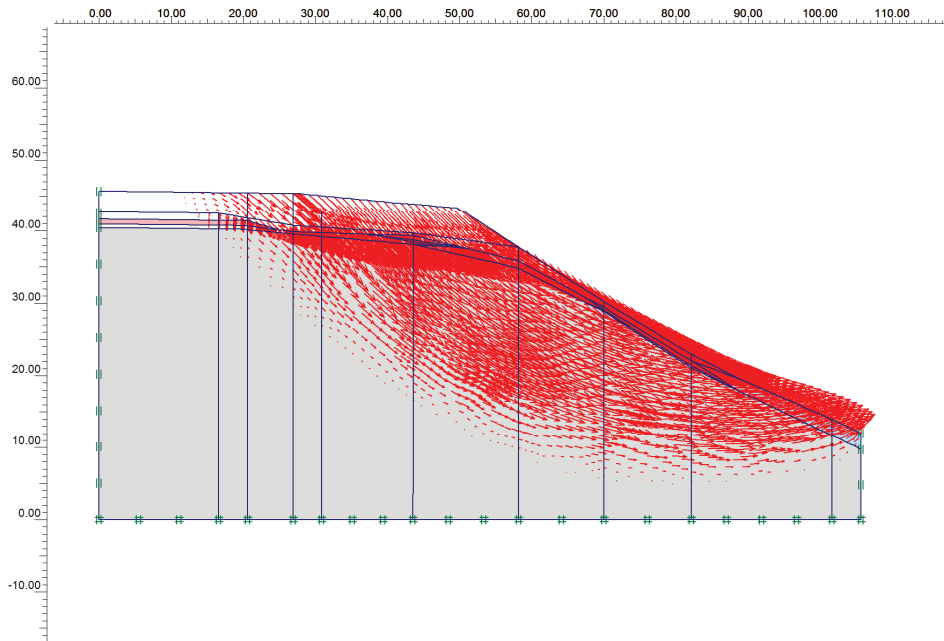


Рис. 6. Векторы полных перемещений грунтового массива в момент возможного разрушения склона

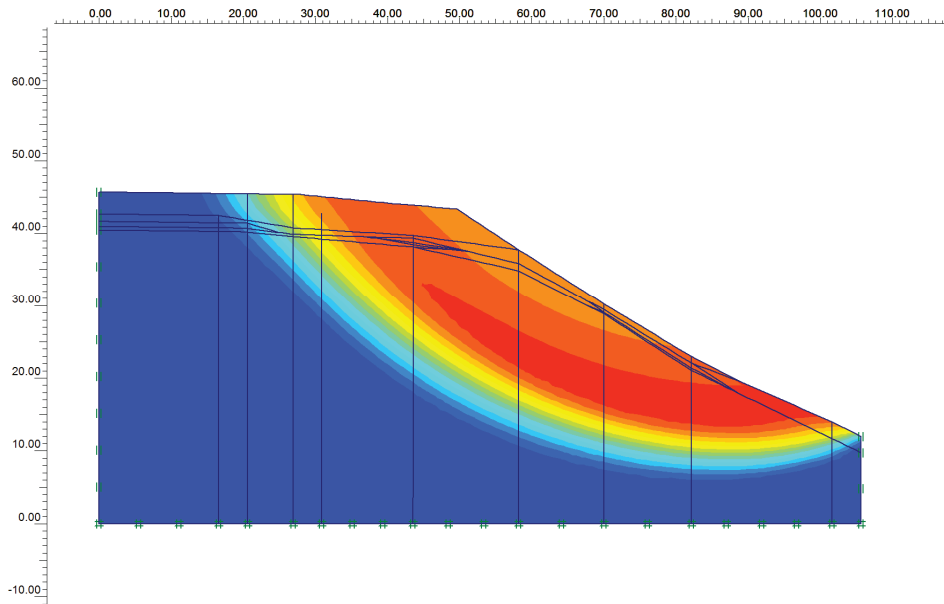


Рис. 7. Изополя полных перемещений грунтового массива при возможном оползне, иллюстрирующие форму поверхности скольжения

При расчете методом круглоцилиндрической поверхности скольжения (рис. 8) предполагается, что потеря устойчивости откоса может произойти в результате вращения грунтового массива относительно некоторого центра O . Поверхность скольжения в этом случае будет представлена дугой окружности радиусом R , очерченной из центра в точке O . Смещающийся массив рассматривается как недеформируемый отсек, все точки которого участвуют в общем движении.

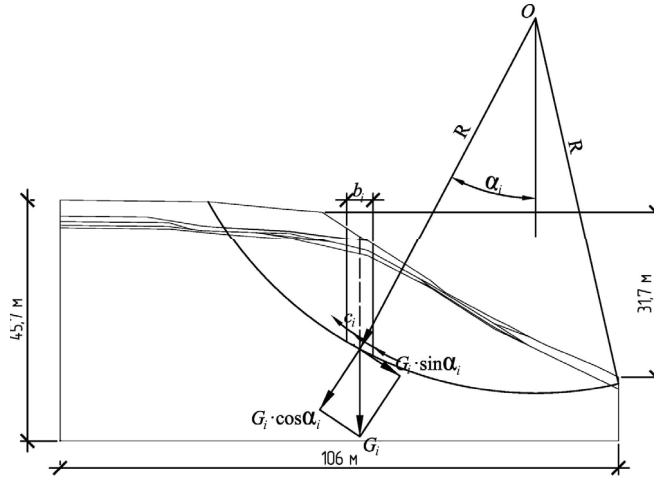


Рис. 8. Схема откоса при расчете по методу круглоцилиндрической поверхности скольжения

Степень устойчивости откоса оценивается различными методами [1]. Наибольшее распространение получили метод Г. Крея, метод К. Терцаги, метод «весового давления» [2].

Коэффициент устойчивости по методу Г. Крея

$$k_y = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (G_i \cdot \sin \alpha_i)} \sum_{i=1}^n \frac{G_i \cdot \operatorname{tg} \varphi_i + c_i \cdot b_i}{\cos \alpha_i (1 + \operatorname{tg} \alpha_i \cdot \operatorname{tg} \varphi_i / k_y)}. \quad (3)$$

Коэффициент устойчивости по методу К. Терцаги

$$k_y = \frac{\sum_{i=1}^n (G_i \cdot \cos \alpha_i \cdot \operatorname{tg} \varphi_i + c_i \cdot b_i / \cos \alpha_i)}{\sum_{i=1}^n (G_i \cdot \sin \alpha_i)}. \quad (4)$$

Коэффициент устойчивости по методу «весового давления»

$$k_y = \frac{\sum_{i=1}^n (G_i \cdot \operatorname{tg} \varphi_i + c_i \cdot b_i / \cos \alpha_i)}{\sum_{i=1}^n (G_i \cdot \sin \alpha_i)}. \quad (5)$$

Результаты расчета устойчивости откоса по методам круглоцилиндрических поверхностей скольжения и с использованием МКЭ представлены в таблице.

Результаты расчета параметров с использованием различных методов

| Метод расчета | k_y | R , м | X_0 , м | Y_0 , м |
|---------------------------|--------|---------|-----------|-----------|
| Метод Г. Крея | 0,9801 | 71,03 | 90,00 | 81,11 |
| Метод К. Терцаги | 0,9331 | 71,03 | 90,00 | 80,00 |
| Метод «весового давления» | 0,9952 | 71,03 | 90,80 | 80,00 |
| МКЭ, в PLAXIS | 0,9998 | 77,58 | 85,28 | 86,54 |

Коэффициент устойчивости откоса, полученный по различными методикам, составляет $k_y = 0,933...0,999$, т.е. грунтовый массив находится в предельном состоянии.

Выполненные расчеты показали сходимость результатов, полученных с использованием МКЭ в программном комплексе PLAXIS, с результатами, полученными по традиционным методам круглоцилиндрических поверхностей скольжения. Таким образом, использование МКЭ позволят выполнять расчет устойчивости грунтовых откосов с достаточной для инженерной практики точностью.

Библиографический список

1. Гидротехнические сооружения: справ. проектировщика / Г.В. Железняков [и др.]; под общ. ред. В.П. Недриги. – М.: Стройиздат, 1983. – 543 с.
2. Рекомендации по выбору методов расчета коэффициента устойчивости склона и оползневого давления / ЦБНТИ Минмонтажспецстроя СССР. – М., 1986. – 123 с.

Получено 8.11.2011