

МЕТОД РАСЧЕТА УСТОЙЧИВОСТИ ПУТЕМ СНИЖЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Аннотация. В статье приводится сравнение расчетов устойчивости методами предельного равновесия (МПР) и методом снижения прочности, используемым при вычислениях методом конечных элементов (МКЭ). Расчеты путем численного моделирования (МКЭ) имеют определенные преимущества перед широко применяемыми методами предельного равновесия (Бишоп, Шахунянц и др.) при сложных инженерно-геологических условиях, и дают близкие результаты при расчетах в простых случаях (однородный откос).

Ключевые слова: методы расчета устойчивости, методы предельного равновесия, численное моделирование, МКЭ, Plaxis, геосинтетические материалы.

Abstract . The article compares the stability calculations of limit equilibrium methods and the method of reducing the strength used in the calculations using finite element method. Calculations by the numerical modeling have certain advantages over the widely used methods of limiting equilibrium (Bishop, Shahunyans , etc.) in difficult geological conditions , and give similar results of the calculations in simple cases.

Key words: methods of calculation of stability, limit equilibrium methods, numerical modeling, FEM , Plaxis, geosynthetics.

Введение

В строительной практике для определения устойчивости грунтового сооружения или склона, как правило, используются методы предельного равновесия, разработанные такими авторами как Шахунянц, Маслов, Терцаги, Бишоп, Моргенштерн, Спенсер и многими другими.

В расчетной модели принимается ряд допущений [1]:

- используется гипотеза затвердевшего тела;
- допускается определенная форма поверхности скольжения;
- напряжения заменяются силами;
- принимаются допущения о давлении грунтовых вод и сейсмичности.

Общая последовательность применения методов предельного равновесия такова, что сначала задаются поверхностью скольжения, после чего путем итераций определяется положение критической поверхности скольжения, с минимальным значением коэффициента устойчивости. Как следует из приведенной последовательности, недостатком этого подхода является то, что поверхность скольжения задается до начала расчета. Как правило, решение о возможной форме поверхности скольжения принимается на основе расчетов по круглоцилиндрическим, или по полигональным (предопределенным) поверхностям скольжения [2], однако существуют такие программы, в которых поверхность скольжения может быть комбинированной или задана логарифмической спиралью (GenID32, Slide).

Таким образом, исходя из необходимости охватить как можно больше встречающихся на практике случаев (разнородное геологическое строение, наличие грунтовых вод, сейсмические воздействия и пр.) методы предельного равновесия имеют много допущений и упрощений, но при этом позволяют получать достаточные для практики результаты в случае наличия инженерно-геологических условий средней степени сложности.

Сложности использования методов предельного равновесия

Существует большое количество программ, реализующих методы предельного равновесия (GGU Stability; GeoStab; GeoStudio; SlopeStability; Slide; DCGeotex; MRE; MacStars 2000, GenID32 и др.), призванных облегчить работу проектировщика-расчетчика. Проблемы использования программ является отсутствие доступной для проектировщика информации и применимости того или иного метода (как правило зарубежного), отсутствие в нормативных документах четкого указания на применения конкретного метода расчета и разница (в некоторых случаях существенная) между заложенными в программу методами расчета устойчивости.

Известный специалист по расчетам устойчивости в области гидротехнического строительства - Р.Р. Чугаев, анализируя большое разнообразие методов расчета устойчивости, выделил всего четыре способа, отличающиеся своей оригинальной системой сил, действующих на отсеки (это связано с невозможностью рассчитать статически неопределимую систему, образованную рядом твердых отсеков-столбиков, стоящих на дуге обрушения, пользуясь только тремя уравнениями

статики): Свена-Гультена, Феллениуса, Крея, Терцаги. Другие известные способы (Бишоп, Маслова, Шахунянца и др.) касаются главным образом только техники расчетов или учету тех или иных дополнительных усложняющих элементов, при этом такого рода предложения не затрагивают существо самих силовых схем, положенных в основу расчета [3].

Методы расчета делятся по механизмам: удовлетворяющие общему равновесию моментов (Феллениуса, Бишоп), методы равновесия сил (Шахунянца, Крея, Маслова-Берера) и методы равновесия моментов и сил (Янбу, Моргенштейна и Прайса, Спенсера).

Еще одним существенным различием методов расчета устойчивости является учет сил. Можно выделить три категории методов (рис. 1):

1. Учитывающие только основные силы;
2. Учитывающие горизонтальные силы взаимодействия отсеков;
3. Учитывающие вертикальные и горизонтальные силы взаимодействия между отсеками.

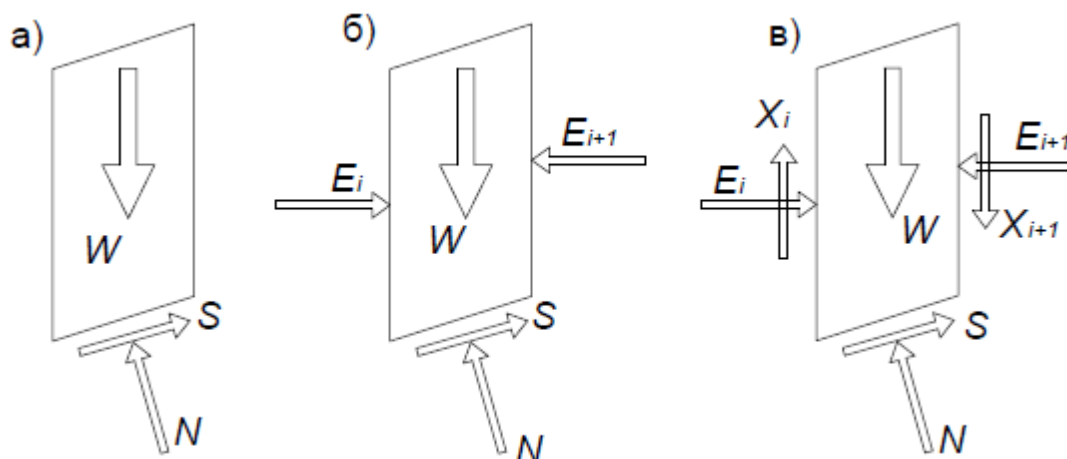


Рис. 1 Схемы учета сил: а) только основные; б) основные и горизонтальные; в) основные, горизонтальные и вертикальные.

Если судить по критерию максимального учета сил, действующих на отсек, то такие методы как Моргенштейн-Прайс и Спенсер являются наиболее достоверными.

По опыту использования различных программ можно сказать, что в случаях расчетов сложных оползневых склонов, чтобы выявить наилучшее положение линии поверхности скольжения, требуется выполнение расчетов по различным поверхностям скольжения и с заданием разного рода ограничений, что требует определенного навыка и опыта. А в случаях, казалось бы, более простых, как например армирование высокой насыпи, возникают сложности с определением окончательного коэффициента устойчивости, поскольку большая часть методов свидетельствует об устойчивом состоянии, а считающийся в нашей стране наиболее достоверным метод проф. Шахунянца показывает, что устойчивость недостаточна.

Здесь следует понимать, что ни один из авторов методов расчета устойчивости не предполагал в своем методе наличие геосинтетических прослоек [4,5].

Метод снижения прочности

Способом определения устойчивости, лишенным описанных недостатков, является метод снижения прочности. Во-первых, согласно положенному в основу принципу, поверхность скольжения определяется автоматически в ходе расчета, а во-вторых, учет геосинтетических прослоек в программах, использующих этот метод, на наш взгляд более совершенен [4,5].

Из положений механики грунтов известно, что напряженное состояние в какой-либо точке грунта рассматривается как предельное в том случае, когда незначительное добавочное воздействие нарушает равновесие и приводит грунт в неустойчивое состояние. Разрушение грунта происходит в результате преодоления внутренних сил трения и сцепления между частицами по определенным поверхностям скольжения.

В общем виде устойчивость сооружения определяется коэффициентом безопасности, представляющим собой отношение максимально возможной прочности грунта $\tau_{пред}$ к минимальному значению, необходимому для обеспечения равновесия $\tau_{действ}$:

$$\text{коэффициент безопасности} = \frac{\tau_{\text{пред}}}{\tau_{\text{действ}}} \quad (1)$$

Если формулу (1) представить в виде стандартного условия Кулона, то она примет вид:

$$\text{Коэффициент безопасности} = \frac{\sigma_n \cdot \text{tg}\varphi' + c'}{\sigma_n \cdot \text{tg}\varphi_r + c_r} = K_{\text{уст}}$$

Где c' и φ' – исходные параметры прочности и σ_n – фактическое нормальное напряжение; c_r и φ_r – параметры прочности, сниженные в ходе расчета до минимальных значений, достаточных для поддержания равновесия.

Метод снижения прочности (**SRM – shear reduction method**) по принципу расчета схож с методом Р.Р. Чугаева, известном в гидротехническом строительстве [3]. Метод снижения прочности реализован в программах, работающих на основе метода конечных элементов и конечных разностей (Plaxis, GEO5, Phase2, FLAC). Прогноз разрушения осуществляется путем одновременного понижения обоих показателей сдвиговой прочности:

$$c_r = \frac{c}{K_{\text{уст}}}$$

$$\varphi_r = \frac{\varphi}{K_{\text{уст}}}$$

Где $K_{\text{уст}}$ – коэффициент снижения прочности, соответствующий коэффициенту устойчивости в момент разрушения.

Последовательность расчета следующая: коэффициенту снижения прочности ($K_{\text{уст}}$) присваивается значение $K_{\text{уст}}=1$. В ходе расчета $K_{\text{уст}}$ увеличивается, при этом сопротивление сдвигу и деформация оцениваются на каждом этапе до наступления разрушения. Результаты вычислений приводятся в виде графиков, на которых показано влияние коэффициента снижения прочности ($K_{\text{уст}}$) на смещение контрольной точки (узла сетки конечных элементов). Критерий разрушения модели определяется условием Кулона-Мора. Если в результате конечно-элементного расчета будет получено решение для последнего устойчивого состояния откоса, то график расчетов примет горизонтальное положение и коэффициент снижения прочности будет соответствовать коэффициенту устойчивости $K_{\text{уст}}$. Поверхность скольжения при использовании МКЭ формируется во время расчета.

Существенным преимуществом метода снижения прочности по сравнению с методами предельного равновесия является то, что поверхность скольжения и коэффициент устойчивости определяются одновременно в процессе расчета.

Применение численных методов расчета (МКЭ) регламентируется такими документами как: **СП 16.13330.2012** «Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения» (Актуализированная редакция СНиП 22-02-2003) и **ОДМ 218.2.006-2010** Рекомендации по расчету устойчивости оползнеопасных склонов (откосов) и определению оползневых давлений на инженерные сооружения автомобильных дорог. **ОДМ 218.001-2009** «Рекомендации по проектированию и строительству водопропускных сооружений из металлических гофрированных структур на автомобильных дорогах общего пользования с учетом региональных условий (дорожно-климатических зон)».

Проведенные анализы сопоставления расчетов устойчивости по методам предельного равновесия и снижения прочности для большого количества параметров насыпей с различной конфигурацией показали, что такие методы, как Тейлора (с расчетом по недренированной прочности c_u), Бишопа, Моргенштейна (прочность задавалась эффективными характеристиками c' и φ'), которые можно считать проверенными временем, не имеют большого расхождения с расчетами по методу снижения прочности. Расхождения в несколько процентов связаны с тем, что МПР используют исключительно круглоцилиндрические поверхности скольжения, а метод снижения прочности не имеет никаких ограничений по геометрии механизма разрушения [2].

Еще одним существенным преимуществом использования метода снижения прочности является его единство с другими возможностями численного моделирования. Это обстоятельство позволяет принять в расчет погруженную часть насыпи при расчете устойчивости на слабых (сжимаемых) грунтах, с учетом процессов консолидации основания и его упрочнения, чего никаким образом нельзя сделать при расчете методами предельного равновесия. А также выполнять расчет устойчивости с учетом избыточного порового давления, формирующего «отпор» в центральной части насыпи и способствующего снижению устойчивости откосных

частей, где эффективные давления максимальные (рис. 2). При таком расчете устойчивость насыпей на водонасыщенных глинистых грунтах оказывается значительно ниже.

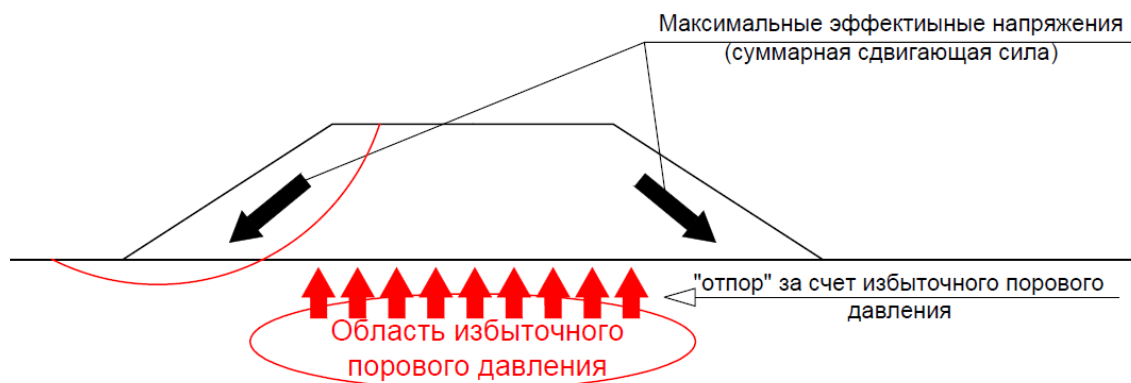


Рис. 2 Схема к расчету устойчивости с учетом избыточного порового давления

Использование численного моделирования и расчет устойчивости по методу снижения прочности позволяет решать задачу по определению длительной прочности геосинтетических материалов. При расчетах по МПР (упруго-пластический расчет) необходимо задаться длительной прочностью $R_{длит}^{МПР}$ (рис. 3), определяемой по [6,7], и произвести оценку устойчивости, после чего будет известна кратковременная (номинальная) прочность $R_{кр}^{МПР}$. При численном моделировании (консолидационный расчет) с учетом «отпора» сил избыточного порового давления для обеспечения устойчивости сооружения потребуются расчетная длительная прочность геоматериала $R_{длит}^{конс} > R_{длит}^{МПР}$, которая после завершения процесса консолидации снизится. Учитывая, что под длительной прочностью подразумевается остаточная прочность в расчете на 120 лет, в результате численного расчета получается, что кратковременная (номинальная) прочность, полученная с учетом процессов консолидации меньше, чем полученная при расчетах методами предельного равновесия $R_{кр}^{конс} < R_{кр}^{МПР}$.



Рис. 3 График определения длительной прочности геосинтетического материала

Заключение

Использование численного моделирования позволяет решать сложные геотехнические задачи, связанные с индивидуальным проектированием, которые достаточно часто встают перед проектными организациями. Положенный в основу программ численного моделирования метод расчета устойчивости путем снижения прочностных характеристик имеет ряд преимуществ перед традиционно используемыми методами расчета устойчивости на основе уравнений предельного равновесия. Для простых случаев все методы дают одинаковый результат, однако термин

«индивидуальное проектирование» подразумевает сложные инженерно-геологические условия, что требует применения более точных методов расчет

Сложность освоения программ численного моделирования, отсутствие соответствующих предметов у студентов строительных вузов, а также ограниченное количество литературы по этому вопросу накладывает ограничения на использование этих методов. Однако в мировой практике использование геотехнических программных комплексов считается современным и актуальным. В то же время не стоит отказываться от традиционных методов предельного равновесия для проверки полученных результатов, поскольку численное моделирование в виду сложности требует серьезного опыта и интуиции.

Библиографический список:

1. Рекомендации по выбору методов расчета коэффициента устойчивости склона и оползневого давления М.:ЦБНТИ, 1986

2. W.F. Van Impe, R.D. Verastegui Flores Underwater Embankments on Soft Soil: A Case History. University of Ghent, Belgium

3. Чугаев Р.Р. Расчёт устойчивости земляных откосов и бетонных плотин на нескальном основании по методу круглоцилиндрических поверхностей обрушения. М.: Госэнергоиздат, 1963. - 144 с.

4. Вавринюк Т.С., Федоренко Е.В. Расчеты устойчивости земляного полотна с геосинтетическими материалами. Журнал «Красная линия», выпуск Дороги №69 май 2013

5. Рекомендации по применению геосинтетических материалов в конструкциях промышленных дорог. СПб.:Миакон, 2013

6. ОДМ 218.5.003-2010 Рекомендации по применению геосинтетических материалов при строительстве и ремонте автомобильных дорог.

7. Пособие по проектированию земляного полотна автомобильных дорог на слабых грунтах. М., 2004.