

РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ ГРУНТОВ

Далидовская А.А.

(Научный руководитель – Пастушков В.Г.)

С ростом урбанизированных территорий и активным освоением подземного пространства в последние годы значительно возросло использование специализированного геотехнического программного обеспечения для расчета прочности и устойчивости грунтовых оснований. В современных геотехнических расчетах используются математические модели грунтов разной степени сложности. В более простых моделях меньшее количество входных параметров и определяющие уравнения простые и ясные. Однако результаты расчета могут не соответствовать реальной работе грунта в широком диапазоне. Усовершенствованные, сложные расчетные модели дают возможность описать поведение грунта более точно, но запрашивают большее количество различных характеристик грунта.

Модель местных упругих деформаций является линейно-упругой, то есть предполагает прямую пропорциональность между напряжением в точках поверхности и осадкой в этой точке. Данная модель обладает существенным недостатком – с ее помощью невозможно определение осадки за пределами загруженной площади, в связи с чем ее применение ограничено только расчетами собственной осадки новых сооружений.

Модель линейно деформируемого упругого полупространства является прямым следствием гипотезы о рассмотрении грунта как сплошного однородного изотропного тела. Параметрами данной модели являются модуль общей деформации и коэффициент относительной поперечной деформации. Основным недостатком модели является предположение линейной работы грунта, что требует определения модуля общей деформации в диапазоне напряжений, наиболее соответствующем фактическому диапазону напряжений в основании сооружения.

Кроме того, в случае разгрузки данная модель приводит к существенному завышению поднятий поверхности из-за использования в расчете неизменного модуля деформации.

Модель Jardine используется для описания нелинейного поведения глин при малых деформациях. Модель Jardine является нелинейно-упругой моделью, которая описывает поведение материала при малых деформациях, в отличие от модели Треска, которая используется в расчетах с учетом пластического поведения материала, когда напряжения в материале превышают заданную сдвиговую прочность материала.

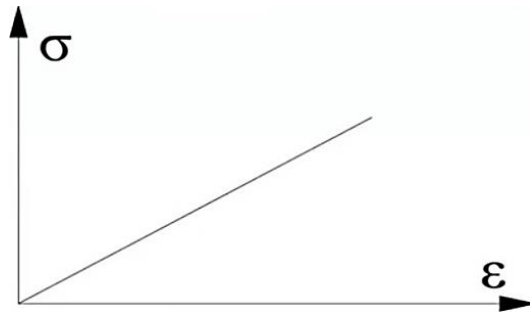


Рисунок 1 – График зависимости «напряжения-деформации»

Модель Jardine описывается нелинейным уравнением, основанным на соотношении между секущим модулем упругости и осевой деформацией, полученном при трехосных недренированных испытаниях на сжатие. При трехосных недренированных испытаниях на сжатие осуществляется пошаговое увеличение осевой нагрузки на цилиндрический образец, при этом поддерживаются постоянные напряжения на боковой поверхности цилиндрического образца. Секущий модуль упругости может быть вычислен с использованием величин, полученных при трехосных испытаниях на сжатие.

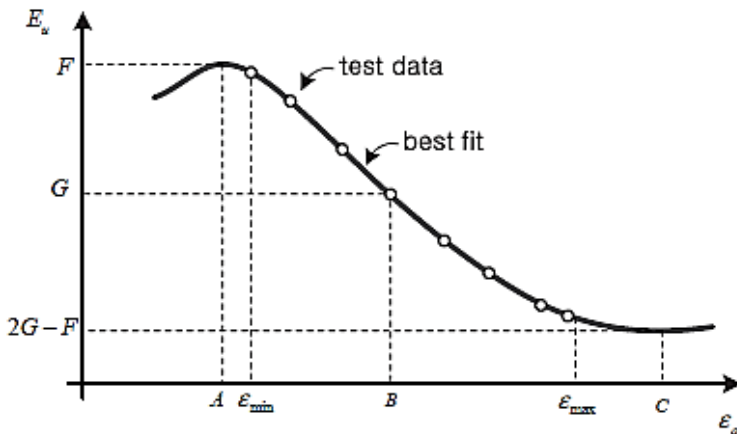


Рисунок 2 – Параметры модели Jardine

Модель D-min является секционной линейной моделью скальных грунтов (крепких и слабых пород). Такие модели характеризуются разными жесткостями на каждом этапе возведения, но при этом они нормализованы таким образом, что жесткость имеет фиксированное значение в пределах отдельного этапа возведения. Считается, что модуль упругости уменьшается, а коэффициент Пуассона возрастает по мере приближения круга Мора к кривой разрушения.

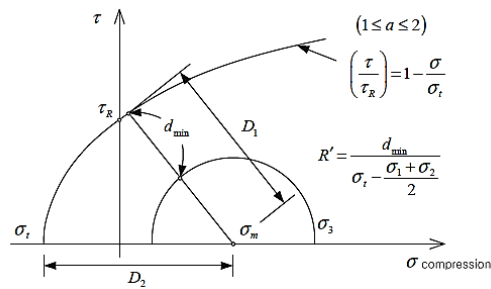


Рисунок 3 – Кривая разрушения и круг Мора для модели D-min

Таким образом, значения модуля упругости и коэффициента Пуассона в каждом сечении определяются величиной относительного расстояния между кругом Мора и кривой разрушения. Параметры свойств материала для данной модели остаются постоянными в пределах каждого этапа нагружения и, таким образом, повторный расчет на каждом этапе нагружения не требуется.

Соотношение напряжений и деформаций для грунтовых материалов становится нелинейным по мере приближения к кривой разрушения, и это может быть учтено путем корректировки модуля упругости основания. Функция гиперболической модели (Duncan-Chang) используется для определения модуля упругости основания. Кривая соотношения напряжений и деформаций является гиперболой, а модуль упругости основания является функцией касательного напряжения и напряжения, создаваемого горным давлением.

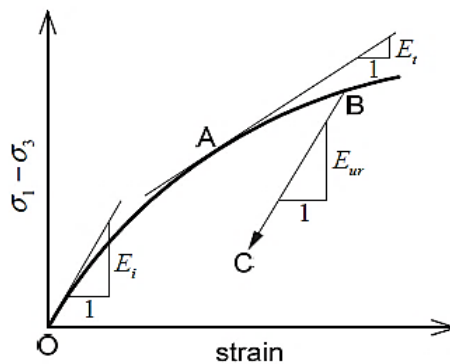


Рисунок 4 – Криволинейная зависимость между напряжениями и деформациями

Это очень удобная формулировка, так как для определения нелинейных моделей материалов требуется задать только такие свойства материала, которые могут быть легко получены по результатам трехосных испытаний или приняты по данным технической литературы. Криволинейная зависимость между напряжениями и деформациями в

модели Duncan-Chang имеет гиперболическую форму в пространстве осевых деформаций, созданных касательным напряжением $\sigma_1 - \sigma_3$. В зависимости от напряженного состояния и траектории нагружения может потребоваться три различных значения модуля упругости основания: начальный модуль E_i , касательный модуль E_t , и модуль разгрузки и повторного нагружения E_{ur} .

Для моделирования работы системы «сооружение – грунт» необходимо провести серию предварительных исследовательских расчетов по моделированию. Руководствуясь действующими нормативно-правовыми актами необходимо придерживаться принципа проектирования по предельно допускаемым деформациям. Его позволяют реализовать упругопластические модели грунта, такие как модель Мора-Кулона и модель упрочняющегося грунта (модифицированная модель Мора-Кулона).

Наиболее простая - модель Мора-Кулона. Она чаще всего используется для моделирования поведения грунтовых оснований, так как демонстрирует достаточно надежные результаты в общих нелинейных расчетах грунтов.

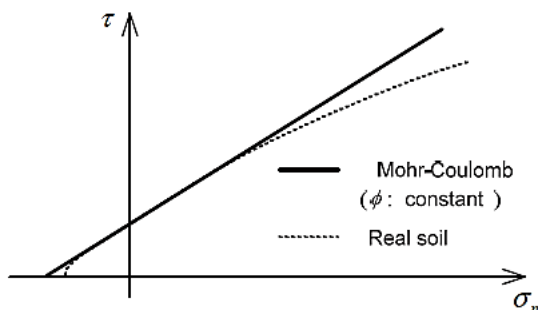


Рисунок 5 – Функция текучести для модели Мора-Кулона

Идеально-упругопластическая модель Мора-Кулона использует закон Гука для описания поля деформаций и условие прочности Кулона для предельного состояния. При возникновении в массиве точки предельного равновесия там развиваются пластические деформации. Параметрами модели являются: модуль общей деформации E , коэффициент Пуассона ν , а также прочностные характеристики: сцепление c и угол внутреннего трения ϕ . Ограничения модели: определение сопротивления грунта сдвигу вблизи предельного состояния, избыточная дилатансия, неспособность описать явления гистерезиса и изменения тензора упругих модулей после наступления предельного состояния. Модель Мора – Кулона пригодна для определения несущей способности грунтов, расчета устойчивости склонов и подпорных стен.

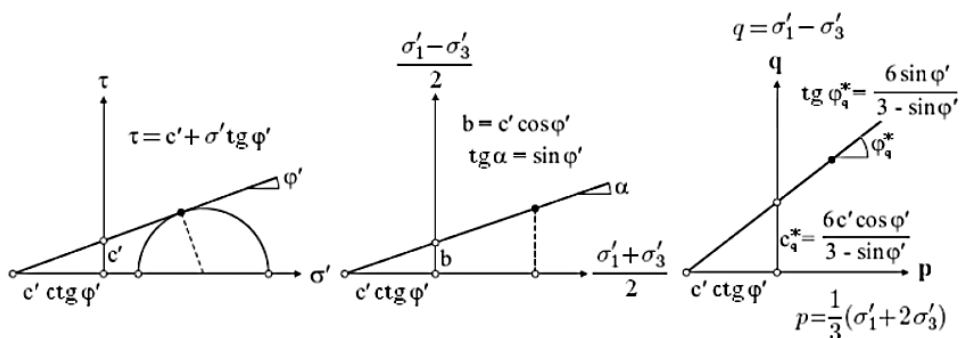


Рисунок 6 – Различные формы представления критерия Мора-Кулона

Модель Друкера-Прагера была разработана для решения численных проблем, которые возникают в углах поверхности текучести модели Мора-Кулона. Функция текучести для данной модели определена таким образом, что девиаторные напряжения могут возрасти или уменьшиться в зависимости от величины гидростатического давления.

Модифицированная модель Cam-Clay – модель глинистых материалов и основана на теории упругопластичности с упрочнением. Для формулировки модифицированной модели используются все компоненты эффективных напряжений, а так же нелинейно-упругий метод и неявный обратный метод Эйлера. Нелинейно упругое поведение представлено повышением объемного модуля упругости при заданном на материал давлении. Так же используется ассоциированный закон течения, а поверхность разрушения может увеличиваться или уменьшаться, в зависимости от упрочения или разуплотнения. Для использования модифицированная модель Cam-Clay требуются значения начального коэффициента пористости, естественных напряжений, а также давления предварительного уплотнения.

Обычно поверхность скального основания представлена трещиноватыми, вследствие выветривания, породами. Модель материала, которая учитывает данное свойство скального грунта, называется моделью трещиноватой скалы. Модели трещиноватой скалы представляют собой поперечно-изотропные идеально-пластические модели материалов. Материал может иметь поперечно-изотропные свойства в упругой области работы материала, зависящие от характеристик слоя скального грунта. Другими словами, слои скального грунта обладают изотропными свойствами в направлении простираения слоя, а в нормальном к поверхности слоя направлении – обладают анизотропными свойствами. Идеально-пластическое поведение таких материалов основано на функции Кулонова трения по главному направлению трещин. Таким образом, идеально-пластическое поведение материалов проявляется по главному направлению трещин по

достижению материалом максимальных касательных напряжений. В качестве главных направлений трещин может быть указано до трех различных направлений, при этом первое главное направление трещин соответствует направлению поперечной изотропии материала.

Модель упрочняющегося грунта (Hardening Soil, Modified Mohr-Coulomb) использует гиперболическую зависимость деформаций от девиаторных напряжений, что точнее соответствует реальному поведению грунта. Кроме того, в модель введен модуль деформации разгрузки при снижении напряжений в элементе.

Модель точно описывает поведение грунта при экскавации грунта, при устройстве подпорных стен и проходке тоннелей, сопровождающейся уменьшением среднего эффективного напряжения и одновременно мобилизацией сопротивления пород сдвигу. Основным преимуществом данной модели является получение параметров приближенных к условиям естественной работы грунта. При этом наблюдается увеличение жесткости и более достоверная реакция модели. Ограничения модели: неспособность учесть явления анизотропии прочности и жесткости, ползучести и длительной прочности, непригодность для моделирования динамических процессов.

Расчеты современных проектов сооружений, возводимых в сложных инженерно-геологических и стесненных условиях, невозможны без применения современных программных комплексов, которые могли бы учитывать реальную работу грунта. Процесс установления параметров грунта для последующего численного моделирования является важнейшей составляющей обеспечения качества оценки напряженно-деформированного состояния грунтового массива. Поэтому необходимо уделить особое внимание выбору модели грунта и входных параметров.

Литература

1. Пастушков, В.Г. Некоторые особенности проектирования и строительства подземного общественно-торгового центра с паркингом в г. Минске / В.Г. Пастушков, Г.П. Пастушков // Наука та прогрес транспорту. 2010. № 32. С. 91-95.
2. Пастушков, Г.П., Основные требования к проектированию мостовых конструкций в соответствии с европейскими нормами / Г.П. Пастушков, В.Г. Пастушков // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. 2013. Т. 3. С. 368-375.
3. Строкова, Л.А. Научно-методические аспекты создания расчетных моделей грунтовых оснований // Известия ТПУ . 2010. №1.
4. ТКП EN 1990-2011(02250) Еврокод. Основы проектирования строительных конструкций // МАиС, Минск, 2012, 70с.
5. Brinkgreve R.B.J. Selection of soil models and parameters for geotechnical engineering application // Soil Constitutive Models: Evaluation, Selection, and Calibration. Ed. J.A. Yamamuro, V.N. Kaliakin. – American Society of Civil Engineers, 2005. – V. 128. – P. 69–98.