

ЭТАПЫ РЕАЛИЗАЦИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГРУНТА В УСЛОВИЯХ СПЛОШНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ НАГРУЗКИ

Г.И. Швецов, О.В. Дремова, А.В. Барышников

Описана механическая модель грунта в условиях компрессии, которая учитывает структурно-текстурные особенности оснований из лессовых пород. Приведены основные этапы реализации модели при программировании.

Ключевые слова: модель грунта, лессовые грунты.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка расчетных моделей грунтовых оснований, адекватно отражающих поведение пород, приобретает все большее научно-прикладное значение в инженерной геологии. Модель с одной стороны должна позволять понять, как устроен конкретный объект, каковы его структура, свойства, законы развития и взаимодействия с другими объектами, с другой стороны – с помощью модели можно с определенной долей вероятности оценить состояние и спрогнозировать поведение объекта в любой его точке в интересующие моменты времени.

Профессор John BurLand выдвинул идею о том, что геотехническая практика складывается из трех взаимосвязанных частей: установление геологического разреза, определение поведения грунта и применение полученных сведений в моделировании. До середины 20-го века было принято описывать поведение грунтов как линейно-упругое, подчиняющееся закону Гука. Однако в реальности грунты проявляют не только упругие, но и пластические, хрупкие и вязкие свойства. Грунт является исключительно сложным «материалом», реально-дискретным, анизотропным, многофазным, с выраженными реологическими свойствами. Его поведение определяется протеканием многих параллельно идущих процессов различной механической природы. И поэтому для оценки механических свойств грунтов используются представления и методы из различных разделов механики сплошной среды (теории упругости, пластичности, ползучести, механики разрушения и фильтрации).

Сложность создания модели грунта определяется многими факторами:

- устанавливаемые экспериментально отклики грунтов на внешние воздействия зависят от всей предыстории формирования грунтового массива, характера, скорости и продолжительности приложения внешних

сил, от физико-химического состава самого грунта, и поэтому часто невозможно однозначно определить закон связи между напряжениями и деформациями;

- моделируемая среда не обладает статистической природой. В статистической теории особую роль играют независимые, случайные величины и независимые признаки. В реальной ситуации показатели физико-механических свойств грунтов почти всегда взаимосвязаны;

- разработанная модель может быть справедлива только в определенных условиях и для определенных грунтов.

Многие ученые предлагали свои подходы для создания механической модели грунта. Но существующие модели определения осадки грунта носят, в основном, эмпирический характер, и поэтому не учитывают в явной форме изменения структуры грунта при его нагружении. Если попытаться учесть в математических моделях структурные изменения грунта, то можно резко повысить уровень их интерпретируемости и достоверности. А возможность экстраполировать компрессионные испытания на штамповые значительно уменьшит трудозатраты, время и стоимость испытаний грунтов.

Появление высокоскоростных компьютеров и новых современных технологий позволяет описать сложное нелинейное поведение грунтов, используя математическое и компьютерное моделирование, что дает возможность «проиграть» на компьютере различные параметры и сопоставить полученные результаты с данными непосредственных наблюдений.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Доктором геолого-минералогических наук, профессором Швецовым Г. И. совместно с Береговым В. И. была предложена имитационная модель лессового грунта в условиях сплошного распространения нагрузки (ком-

ЭТАПЫ РЕАЛИЗАЦИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГРУНТА В УСЛОВИЯХ СПЛОШНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ НАГРУЗКИ

прессионных испытаний). Имитационное моделирование — это метод, позволяющий строить модели, описывающие процессы так, как они проходили бы в действительности. При имитационном моделировании изучаемая система заменяется моделью, с достаточной точностью описывающей реальную систему и с ней проводятся эксперименты с целью получения информации об этой системе. При этом результаты будут определяться случайным характером процессов, но по этим данным можно получить достаточно устойчивую статистику.

В рассматриваемой модели учтена такая особенность грунтов, как их раздробленность (дискретность), то есть то, что грунты состоят из твердых частиц различной крупности либо не связанных между собой, либо имеющих связи, существенно меньше прочности самих частиц.

Предложенная имитационная модель анализирует три основных состояния лессового грунта, выделенные по результатам микроструктурных исследований:

- природное состояние;
- первая стадия нагрузки: давление на грунт до 0,1 МПа;
- вторая стадия нагрузки: давление на грунт от 0,1 МПа до 0,4 МПа;

Исходными данными при моделировании являются:

- характеристики грунта: влажность (W , %) и коэффициент пористости (e , %);
- максимальная нагрузка на грунт (P , МПа).

Принимается, что в природном состоянии грунт состоит из ряда фракций. Во фракции объединяются частицы, близкие по своим физико-механическим свойствам (размеры, форма, минеральный состав и т.д.). Количество частиц каждой фракции для нескольких ступеней нагружения определяется из дешифрирования изображений, полученных на растровом электронном микроскопе. Образец РЭМ-изображений приведен на рисунке 1.

Изменение количества частиц, принадлежащих выбранным фракциям, при разных стадиях нагружения отображается структурными кривыми. На рисунке 2 указана характерная картина для маловлажных лессовых грунтов. При повышении влажности экстремум, имеющийся при $P=0,1$ МПа, смещается к $P=0,15-0,2$ МПа.

На основании исследований изменения микроструктуры лессовых пород при передаче постепенно возрастающих нагрузок установлено, что на первых ступенях давлений

(до $P=0,1$ МПа) происходит значительное дробление частиц грунта и, как следствие, увеличение их общего числа. Особенно это характерно для фракций размером 3-6 мкм.

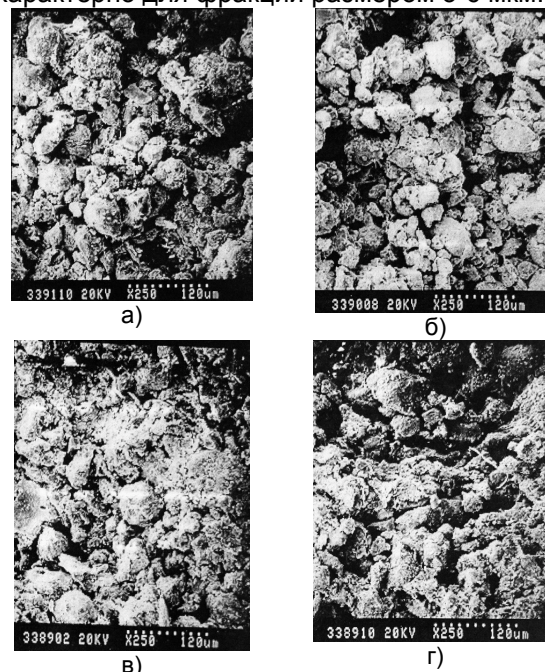


Рисунок 1 – РЭМ-фотографии лессового грунта: а) в естественном состоянии; б)-г) после компрессионного уплотнения при давлении: б) $P=0,1$ МПа, в) $P=0,2$ МПа, г) $P=0,3$ МПа

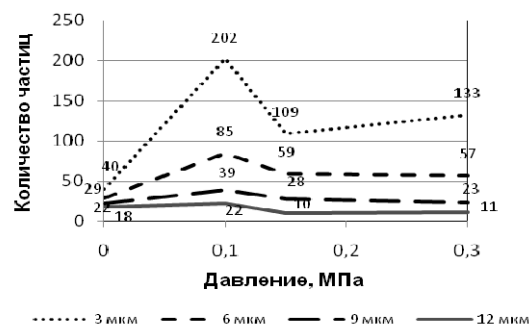


Рисунок 2 – Изменение количества частиц указанных размеров при передаче внешнего давления (структурные кривые)

Таким образом, при передаче давления, изменяется число частиц, принадлежащих разным фракциям. В итоге частица из какой-либо фракции может с некоторой вероятностью сохраниться или образовать частицы более мелких фракций. Схема такого дробления представлена на рисунке 3.

Для учета пор в грунте вводится специфическая фракция, которая характеризует объем пор в грунте. Эта фракция распределяется между фракциями частиц в зависимости от их количества и размера. При имита-

ции уменьшение объема пор моделируется введением «функции пористости», которая описывает процесс изменения объема пор в грунте. График «функции пористости» приведен на рисунке 4.

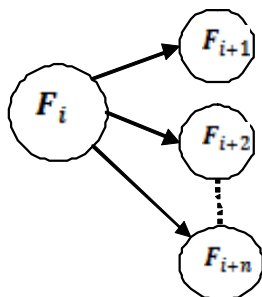


Рисунок 3 – Схема дробления частиц при передаче внешней нагрузки

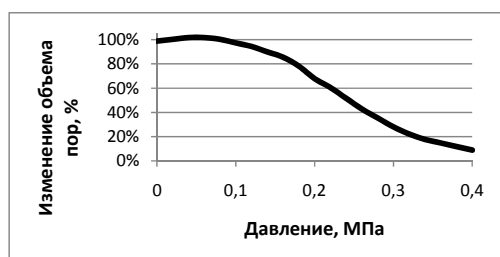


Рисунок 4 – Компрессионная кривая лессовых маловлажных грунтов

При малых нагрузках объемы пор для частиц фракций остаются такими же, как и в исходном состоянии. Сокращение объема пор происходит только за счет изменения распределения частиц по фракциям.

Для каждой ступени нагружения вычисляется новый объем пор V_0^P по формуле 1:

$$V_0^P = \sum_{i=1}^n n_i^P \cdot v_{i0}, \quad (1)$$

где n_i^P - количество частиц i -й фракции,

v_{i0} - объем пор, приходящийся на частицу i -й фракции.

С увеличением давления до 0,2 МПа процесс дробления частиц грунта резко замедляется, что свидетельствует о формировании новой микроструктуры, характеризующейся как бы «слипанием» частиц между собой и их более плотной компоновкой. Дальнейшее увеличение давления, особенно у крупных фракций, приводит к агрегированию частиц, т.е. к формированию еще более плотной микроструктуры. Таким образом, происходит агрегирование мелких частиц грунта в более крупные, сопровождаемое

уменьшением объема пор «принадлежащих» частицам всех фракций. В результате происходит еще большее уменьшение объема пор.

Уменьшение объема пор, отмеченное на первой и второй стадиях нагружения грунта, приводит к осадке грунта под давлением. Для перевода объема пор в осадку ($S_{(P_i)}$) вводится расчетная формула 2, базирующаяся на эмпирически установленных связях:

$$S_{(P_i)} = k \sum_{i=1}^n (V_0^{P_{i-1}} - V_0^{P_i}), \quad (2)$$

где $V_0^{P_{i-1}} - V_0^{P_i}$ - изменение объема пор на i -й и $i-1$ -й стадиях нагружения; k - коэффициент, устанавливаемый эмпирическим путем, который для маловлажных супесей вычисляется по формуле 3:

$$k = k_0 \cdot P_i \cdot W \cdot e \quad (3)$$

где k_0 - размерный коэффициент; W - влажность; e - коэффициент пористости.

При использовании модели для других типов грунтов нужно задать данные о структуре грунта и «функции пористости». Также необходимо подобрать коэффициент k , который для лучшего согласования с экспериментальными данными можно вычислять по формуле 4:

$$k = k_0 \cdot P^\alpha \cdot W^\beta \cdot e^\gamma \quad (4)$$

На рисунке 5 приведена схема имитационной процедуры, которая реализует следующие этапы моделирования.

1) Ввод исходных данных:

- о естественном состоянии грунта: коэффициент пористости (e), влажность (W) и конечное давление на грунт (P);

- значений двух наборов структурных кривых и значений двух «функций пористости», соответствующих образцу грунта при естественной влажности $W=15\%$ и замоченному образцу при $W=35\%$.

2) Вычисление значений структурных кривых и «функции пористости» для промежуточных значений влажности на основе процедуры интерполяции.

3) Расчет объема пор в грунте:

- вычисление начальных объемов пор для частиц в природном состоянии;

- определение количества частиц фракций (для фиксированной сетки давлений по структурным кривым), на основе процедуры аппроксимации;

- корректировка начальных объемов пор с использованием «функции пористости»;

ЭТАПЫ РЕАЛИЗАЦИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГРУНТА В УСЛОВИЯХ СПЛОШНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ НАГРУЗКИ

- вычисление суммарного объема пор для каждого значения сетки давлений. Вычисление изменения объема пор.

5) Вычисление осадки грунта по полученным изменениям объема пор в предположении постоянства площади основания образца.

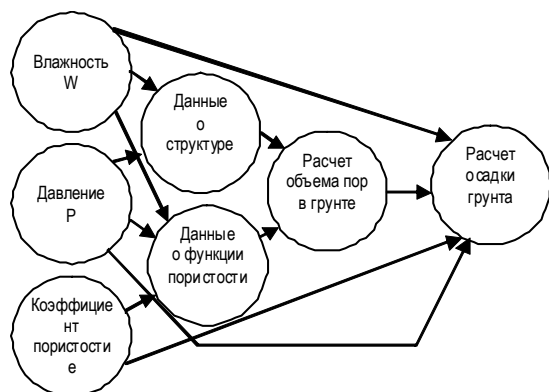


Рисунок 5 – Схема имитационной процедуры

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для реализации имитационной модели была создана программа в среде программирования Delphi, которая позволяет:

- вводить данные о грунте, значения структурных кривых и «функции пористости». Фрагмент окна диалога, предназначенного для ввода исходных данных о грунте при влажности 15%, приведен на рисунке 6. Аналогично задаются параметры для грунта при влажности 35%.

- вычислять значения структурных кривых и «функции пористости» для влажности, значение которой лежит в интервале от 15% до 35% с использованием интерполяции;

- подбирать полиномиальные аппроксимирующие функции, по которым будут вычисляться промежуточные значения количества частиц и значений функции пористости, для выбранной сетки давлений. На рисунке 7 приведен пример подбора степени аппроксимирующей функции;

- выполнять вычисление объема пор для фиксированной сетки давлений с переводом их в осадку;

- выполнять построение компрессионной кривой.

Результатом работы программы является графическое представление компрессионной кривой и рассчитанные значения осадки, которые можно экспортировать в Excel для дальнейшей обработки. На рисунке 8 приведено окно результатов расчета.

Тип грунта
Новый вид грунта
Название: грунт лессовидный

Естественная влажность $W=0.15$
Зависимость количества частиц во фракциях от нагрузки

N фрак	1	2	3	4
D, мкм	3	6	9	12

P, МПа	0	0.1	0.15	0.3	0.4
Np(1)	40	80	109	133	140
Np(2)	29	80	59	57	53
Np(3)	22	20	28	23	20

Компрессионная кривая

P, МПа	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
q(P) %	1	0.9	0.8	0.5	0.2	0.1

Рисунок 6 – Фрагмент окна диалога для ввода данных о грунте, при влажности 15%

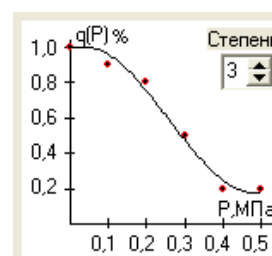


Рисунок 7 – Подбор степени аппроксимирующей функции

Коэффициент корреляции рассчитывался средствами Microsoft Excel, по значениям относительной осадки, полученным в результате испытаний и при моделировании с использованием программы. Используемые значения относительной осадки приведены в таблице 1. Коэффициент корреляции, равный 0,9416, показывает большую близость значений, полученных при моделировании и экспериментальных данных.

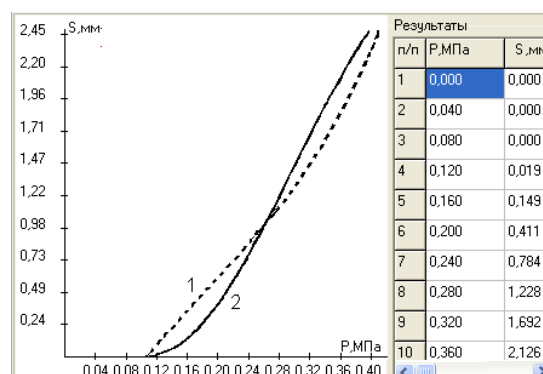


Рисунок 8 – Результаты расчета: 1 – значение осадки, полученное при лабораторных испытаниях; 2 – значение осадки, вычисленное в результате моделирования

Таблица 1 – Значения относительной осадки, полученные в результате испытаний и при моделировании с использованием программы

Давление, МПа	Отношение осадки к высоте образца		Давление, МПа	Отношение осадки к высоте образца	
	Экспериментальные данные	Данные, вычисленные по программе		Экспериментальные данные	Данные, вычисленные по программе
0	0	0	0,15	1,15	0,12
0,01	0	0	0,16	1,25	0,189
0,02	0,1	0	0,17	1,45	0,276
0,03	0,15	0	0,18	1,6	0,379
0,04	0,2	0	0,19	1,8	0,499
0,05	0,3	0	0,2	2	0,636
0,06	0,35	0	0,21	2,2	0,789
0,07	0,4	0	0,22	2,4	0,957
0,08	0,55	0	0,23	2,65	1,14
0,09	0,6	0	0,24	2,8	1,337
0,1	0,75	0	0,25	3	1,546
0,11	0,8	0	0,26	3,1	1,767
0,12	0,85	0,008	0,27	3,2	1,998
0,13	0,95	0,03	0,28	3,4	2,238
0,14	1,05	0,067	0,29	3,55	2,485

ВЫВОДЫ

Представленный комбинированный метод моделирования осадки грунта включает в себя структурную модель (имитация изменения состава грунта в ходе компрессионных испытаний) и эмпирическую модель, позволяющую преобразовать изменение объема образца в осадку. Коэффициент корреляции, равный 0,9416, показывает большую близость значений, полученных при моделировании и экспериментальных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Швецов, Г.И. Инженерно-геологическая природа и законы деформирования лессовых пород (на примере юга Западной Сибири): Дис. ...д-ра г.-м.наук: 04.00.07./ Г. И. Швецов –Иркутск, 1991. – 434 с.
2. Строкова, Л.А. Определяющие уравнения для грунтов. Soil Constitutive Models: учебное пособие / Л.А. Строкова; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – 2-е изд. – Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 151 с.

УДК 624.131.23

ИЗМЕНЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕССОВЫХ ПРОСАДОЧНЫХ ГРУНТОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

В.Н. Лебзак

В статье приведены: изменение прочностных и деформационных свойств лессовых грунтов при различных сроках эксплуатации зданий. Изменение химических процессов и прочности индивидуальных контактов.

Ключевые слова: синергизм, просадочность, деформация.

ВВЕДЕНИЕ

Весьма актуальной проблемой настоящего времени является реконструкция, пере-профилирование и изменения функционального назначения зданий.

Большинство российских городов расположены на берегах крупных рек, вследствие чего основаниями этих зданий преимущественно являются лессовые просадочные грунты. При длительной эксплуатации зданий в их основаниях происходит ряд внутренних процессов, который приводит к изменению прочностных и деформационных свойств лессовых грунтов.

В нашем регионе автором была проведена значительная работа по выявлению основных закономерностей изменения свойств лессовых просадочных грунтов в основаниях зданий при их длительной эксплуатации. Были проведены исследования изменения прочностных и деформационных характеристик лессовых просадочных грунтов в основаниях зданий с различными сроками их эксплуатации, которые колебались в пределах от 10 до 40 лет.

Был выполнен анализ микроструктуры лессовых просадочных грунтов непосредственно под подошвой фундамента, в естественном состоянии и при различных ступенях