

М. В. Малышев

Прочность грунтов и устойчивость оснований сооружений

Р е ф е р а т

Книга имеет Введение и четыре главы основного текста. Она завершается Заключением и Списком литературы.

Во Введении в компактной форме дан краткий обзор отечественных и зарубежных научных публикаций по теме монографии. Из числа первых работ прошлого, посвящённых механическим условиям прочности грунтов и их разрушению, определяющему при значительном развитии зон с предельным состоянием устойчивость оснований, названы работы Паукера, Ренкина, Курдюмова и, конечно, Кулона. Из фундаментальных работ уже нашего века отмечены труды Прандтля, Мизеса, а особенно, отечественных учёных Соколовского, Голушкевича, Флорина, Березанцева, Горбунова-Посадова и ряда других, внесших много полезного в решение рассматриваемой проблемы.

Указывается, что историческое развитие вопросов об определении несущей способности оснований и возводимых на них сооружений шло по трём направлениям: 1/ теоретические решения, основывающиеся на использовании теории предельного равновесия сыпучей среды; 2/ приближённые решения, именуемые часто инженерными, основанные на предварительном задании формы зоны разрушения, в которых отыскивается с применением экстремальных принципов положение наиболее опасной ограничивающей поверхности; 3/ экспериментальные исследования, служащие для проверки полученных теоретических результатов и обоснования для формулировки новых условий. Говорится, что наряду с разработкой относительно строгих методов решения задач, разработка и усовершенствование практических методов и приёмов расчёта не потеряли своей актуальности и сейчас и вряд ли потеряют её и дальше в связи с рядом усложняющих обстоятельств, встречающихся в

практической деятельности. Эти методы иногда могут быть просто оценочными и давать только верхний или нижний пределы, нужные для установления степени надёжности.

Первая глава посвящена механическим условиям прочности, используемым для грунтов. Рассмотрен характер разрушения и возможность его описания с помощью моделей, идеализирующих свойства грунтов. Основное и наиболее часто встречающееся разрушение – сдвиг, при котором происходит взаимное изменение положения частиц скелета, формирующих его структуру. При этом происходит нарушение контактных связей и локальное изменение пористости. Частицы имеют различные форму и размеры. Модель должна воспроизводить главные свойства и учитывать влияние нескольких факторов, реагирующих на внешнее проявление, и представлять собой элемент, из которого потом составляется весь грунтовый массив. Поведение модели определяется прочностными и деформационными параметрами, связанными с напряжённым состоянием. Развивается идея о несовпадаемости направлений реальных и идеальных площадок сдвига в грунте в связи с тем, что он представляет дисперсное тело. На основе этого предлагается новое условие прочности, в котором учитывается влияние всех трёх компонент главных напряжений на прочность. В него вводятся два дополнительных по сравнению с обычными параметра, которые позволяют учесть влияние напряжённого состояния на изменение угла внутреннего трения, который при осесимметричном напряжённом состоянии и плоской деформации оказывается различным, но наличие предложенных параметров позволяет произвести необходимый перерасчёт. При минимально рыхлом сложении грунта предлагаемое автором условие прочности переходит в условие Мора. Здесь также анализируются и сопоставляются ранее предлагавшиеся для грунтов и других материалов условия прочности Кулона–Мора, Мизеса–Боткина и даётся их графическое толкование в пространстве трёх главных напряжений.

Если применяется условие прочности Мора, то среднее главное напряжение вовсе не влияет на величину угла внутреннего трения, а если следовать условию Мизеса-Боткина, то оно оказывает достаточно сильное влияние, причём значительно большее, чем наблюдается в экспериментах. При анализе условия Мизеса-Боткина с помощью рассмотрения устойчивости откоса показана ограниченность его применения для сыпучих грунтов.

Приводятся и анализируются экспериментальные результаты, полученные рядом исследователей с целью анализа влияния среднего главного напряжения, оцениваемого параметром Лоде, на прочность образцов песчаного грунта. Сделано обобщение, по которому учёт влияния среднего главного напряжения позволяет повысить величину угла внутреннего трения, определённую при трёхосных испытаниях, для использования её при условиях плоской деформации. Параметр Лоде при плоской деформации имеет отрицательное значение. Влияние среднего главного напряжения оказывается тем больше, чем выше значение угла внутреннего трения. В связных грунтах это влияние оказывается незначительным.

Вторая глава посвящена деформируемости грунтов при различных напряжённых состояниях и установлению зависимостей между напряжениями и деформациями. Отмечается, что грунты являются дисперсными телами, и деформирование их связано с взаимным перемещением сдвигающихся частиц и изменением пористости. Трёхкомпонентная модель грунта рассчитывается как квазиоднофазная система, то есть без взаимного перемещения компонентов. Описываются зависимости, связывающие изменение формы и объёма квазиоднокомпонентного грунта с действующими напряжениями. Эти зависимости устанавливают связь между инвариантами тензоров напряжений и деформаций, которые предполагаются соосными. Они используются в дальнейших решениях. Отдельно рассматриваются процессы нагрузки и разгрузки,

причём указано, что простое нагружение следует рассматривать в ослабленной форме, чтобы компоненты девиатора напряжений изменялись бы пропорционально одному параметру, главные оси девиатора не изменяли бы своего направления и параметр Лодэ был бы постоянным. Отдельно и достаточно подробно рассмотрены меры деформации и коэффициент бокового давления. Показана взаимосвязь между мерами деформации, в том числе по Коши и по Генки. Последние образуют группу, хотя определяются более сложным образом. Показано влияние даже небольшого бокового деформирования в случаях плоской и осесимметричной задач на величину коэффициента бокового давления, что имеет важное значение для обработки результатов испытаний как линейно, так и нелинейно деформирующихся грунтов в стабилOMETрах. Для объёмного сжатия предлагается использование модуля, линейно зависящего от всестороннего давления. Основные исследования связаны с касательным и, особенно, секущим модулем сдвига, для которых использована дробно-линейная функция. Основываясь на этих нелинейных зависимостях между напряжениями и деформациями, автор предложил практический способ расчёта осадок фундаментов, где деформирующимся предполагается "столб" из грунта, находящийся непосредственно под фундаментом. В нём предполагается однородное напряжённое состояние. До достижения первой предельной нагрузки, соответствующей началу образования областей с пластической деформацией под краями фундамента, столб деформируется без бокового расширения, а далее вертикальные граничные плоскости считаются смещающимися вбок вплоть до достижения нагрузкой второго предельного состояния, соответствующего исчерпанию несущей способности, когда осадка считается бесконечно большой. На этой стадии столб деформируется нелинейно, но связь между приращениями боковой и вертикальной нагрузок считается линейной. Приводятся формулы для расчёта осадки в нелинейной стадии деформирования рассматриваемого массива и сформулирован предлагающийся расчётный способ. В нём

для определения толщины эквивалентного слоя используется решение Цытовича, которое здесь обобщено автором на случай степенной зависимости между сжимающим напряжением и глубиной. Кроме того, проанализированы глубины, в пределах которых происходит разрушение массива в основании по Прандтлю.

Третья глава посвящена вопросам второй основной темы книги – расчётов устойчивости оснований сооружений и определения их несущей способности. Дается дефиниция несущей способности, рассмотрены условия применимости теорий упругости и пластичности к грунтам, вопросы физической и геометрической нелинейности и особенности постановки упруго-пластических задач для расчёта оснований. Указывается на статическую определимость и неоднозначность решений задач теории предельного равновесия сыпучей среды и на необходимость введения пластического потенциала, чтобы перейти к скоростям деформаций. Рассматриваются условия подобия и критерии подобия применительно к задачам статики сыпучей среды. Описывается полученное автором в замкнутой форме для невесомой среды решение упруго-пластической задачи об образовании и развитии в основании под краем фундамента области грунта с предельным состоянием. Это решение показывает, как по мере роста нагрузки развиваются зоны с предельным состоянием. Показано, что наибольшее давление получается при коэффициенте бокового давления, равном единице, а также то, что, определяя размеры пластической области из решения теории упругости, мы их значительно преувеличиваем по сравнению с упруго-пластическим решением. В сжатой форме рассмотрена постановка плоской задачи теории предельного напряжённого состояния сыпучей среды и излагается численный способ решения основной системы уравнений с применением характеристик. Путём введения предложенной автором аппроксимации, линеаризирующей условие прочности, исходная система уравнений теории предельного равновесия для плоской и осесимметричной задач приведена к линейной системе второго порядка относительно

функции напряжений. Отдельно и детально рассмотрена задача о предельно напряжённом сыпучем клине и полученное автором в замкнутом виде её решение, обобщающее решение Прандтля. Далее в главе рассмотрены вопросы кинематики сыпучей среды. Линии, полученные методом фотофиксации, предложенном ещё Курдюмовым и затем часто применяющемся в исследованиях на моделях, трактуются как огибающие траекторий перемещений, а не линии скольжения теории предельного равновесия. Рассмотрены как ассоциированный с условием прочности, так и неассоциированный с ним законы деформирования предельнонапряжённой сыпучей среды. Предложен вид неассоциированного закона, в котором вводится угол трения, соответствующий состоянию критической пористости. Решены задачи для огибающих траекторий перемещений в прямоугольной и треугольной призмах при этих законах, что имеет значение для анализа деформирования зон с максимально напряжённым состоянием в основании. Проанализирована совпадаемость огибающих траекторий перемещений и линий скольжения. Рассмотрены вопросы, связанные с дилатансией сыпучей среды. В конце главы описаны экспериментальные исследования несущей способности, линий скольжения и траекторий перемещений частиц грунта и приведены основные их результаты.

Четвёртая глава является обобщающей темой книги. Она посвящена практическим методам расчётов несущей способности оснований и осадок фундаментов. В начале её излагаются в простой форме оригинальные положения о связи между коэффициентом запаса устойчивости и показателем надёжности. За основу берётся отклонение в три стандарта. Далее рассмотрены способы определения несущей способности при вертикальной и наклонной нагрузках. Предлагается приём для определения предельной нагрузки при эксцентричном её приложении. Особое внимание придаётся учёту шероховатости штампа-фундамента, увеличивающей несущую способность основания по сравне-

нию с гладким штампом. Шероховатость штампа обеспечивает формирование упругого ядра под ним. Анализируются результаты определения несущей способности расчётными методами и приводится обобщённая формула для практического определения несущей способности основания с применением безразмерных коэффициентов, вычисленных согласно решениям теории предельного равновесия сыпучей среды для различных значений угла внутреннего трения. Далее даны коэффициенты, рекомендуемые для учёта наклонной по отношению к подошве нагрузки, пространственности подошвы фундамента и эксцентриситета приложения равнодействующей. Эти результаты собраны из разных отечественных и зарубежных источников и обобщены автором. Для одного из коэффициентов, определяемых путём численного интегрирования основной системы уравнений, проведены подробные вычисления, результаты которых приводятся в виде таблиц. Впервые проведены расчёты коэффициентов для нагрузок с наклоном, противоположным направлению движения массы грунта вследствие выпирания. Последнее позволяет рассмотреть схему выпирания по Хиллу, существенно отличающуюся от схемы Прандтля. В конце в краткой форме описывается рекомендуемый практический метод расчёта осадок фундаментов при нелинейном деформировании грунтов основания.

Книга заканчивается Заключением, в котором сформулированы основные выводы, вытекающие из изложенного. Выводы сводятся к следующему:

1/ Большое влияние величины угла внутреннего трения на несущую способность. Среднее главное напряжение существенно влияет на величину угла внутреннего трения. 2/ Концепция о несовпаде идеальных и реальных площадок скольжения между частицами грунта позволяет обобщить условие прочности Мора и учесть влияние среднего главного напряжения. 3/ Все имеющиеся разработки плоской задачи теории предельного равновесия сыпучей среды, основанной на условии прочности Мора, можно сохранить, но проводить расчёты при повышенных значениях угла внутреннего трения. 4/ Найдено решение упруго-пластической задачи при коэффициенте бокового давления не равном единице и показано его

влияние на размеры и раскрытие предельной области под фундаментом. 5/ Проведено обобщение нелинейных зависимостей, связывающих напряжения и деформации с использованием дробно-линейной функции, на случай больших деформаций. 6/ Предложен инженерный способ расчёта осадок фундаментов с использованием нелинейных зависимостей между нагрузкой и вызываемой ей осадкой, позволяющий соединить оба критерия предельных состояний. 7/ Получено решение, позволяющее установить влияние шероховатости подошвы фундамента и эксцентриситета в приложении внешней нагрузки на несущую способность основания. 8/ Введённое для условия прочности преобразование позволило линеаризовать всю систему уравнений теории предельного равновесия и получить затем её решение в общем относительно функции напряжений виде. 9/ Предложена физически обоснованная форма потенциала пластичности в виде, не ассоциируемом с условием прочности. 10/ Решена кинематическая задача о траекториях перемещений в предельных зонах с простейшим напряжённым состоянием и проанализированы линии скольжения, получающиеся в опытах с фотофиксацией перемещений частиц грунта под штампом. Показано их различие. II/ Опыты с фотофиксацией, благодаря синхронному со штампом перемещению фотокамеры, позволили получить чёткое очертание упругого ядра.



## I. Конкретная научная новизна, отличающая данную работу.

1. Сформулировано новое условие прочности грунтов, обобщающее условие Мора и учитывающее влияние всех трёх главных напряжений.
2. Произведена линеаризация условия прочности Мора, позволяющая привести систему уравнений теории предельного равновесия сыпучей среды, включающих собственный вес грунта, к линейной, интегрируемой в общем виде.
3. Показано, что все имеющиеся разработки теории предельного равновесия сыпучей среды сохраняются, однако расчёты следует производить для значений угла внутреннего трения грунта, определённого при соответствующих условиях плоской деформации в виде напряжённого состояния.
4. Решена упруго-пластическая задача без учёта собственного веса грунта для основания при различном значении коэффициента бокового давления грунта в условиях естественного залегания и получена зависимость для нагрузок, соответствующих зарождению пластической области и её развитию по мере роста нагрузки.
5. Получено решение задачи для сыпучего клина при степенном законе изменения напряжений вдоль радиуса, обобщающее решение Прандтля.
6. На основе решений задач о простейшем напряжённом состоянии установлено, что линии, получающиеся при фотофиксации, следует рассматривать как огибающие траекторий перемещений частиц, а не как линии скольжения предельнонапряжённой сыпучей среды.
7. Сформулировано новое физически обоснованное понятие потенциала пластичности, не ассоциируемого с условием прочности.
8. Согласно схеме Хилла произведен учёт трения по подошве штампа-фундамента, увеличивающего несущую способность основания, и рассчитаны необходимые для этого коэффициенты.
9. Установлена связь между показателем надёжности и коэффициентом запаса по устойчивости основания.
10. Предложен новый инженерный метод расчёта осадок фундаментов за

пределом линейной зависимости между осадкой и нагрузкой с использованием дробно-линейной функции.

## 2. Соответствие передовому мировому уровню.

Большинство из приведенных решений задач, полученных автором, являются новыми и оригинальными. Книга также обобщает имеющийся мировой опыт в рассматриваемой в ней области, содержит необходимые указания на работы, опубликованные в мировой литературе, поэтому она вполне соответствует мировому уровню, отвечающему современному состоянию механики грунтов.

## 3. Внедрение в практику на территории Российской Федерации.

Внедрение в практику решений, полученных автором, производилось по мере их публикации в журнальных статьях специализированной периодической печати, в форме публикации докладов в трудах международных конгрессов и конференций и форме публикаций монографий. Результаты работ использованы в нормативных материалах – Строительные нормы и правила, глава "Основания зданий и сооружений" СНиП 2.02.01-83, Руководство. В целом ряде отечественных и зарубежных научных публикаций, учебниках и учебных пособий имеются ссылки на работы автора книги. Оценка её дана в рецензии в журнале "Основания, фундаменты и механика грунтов" № 4, 1995 г., стр. 31-32.

## 4. Количество публикаций по данной работе.

Ссылки на публикации оригинальных работ /14 ссылок по списку литературы/ имеются в первом издании монографии автора "Прочность грунтов и устойчивость оснований сооружений", Стройиздат, М., 1980 и дополнительно во втором, настоящем издании книги /на четыре работы/.

*М.М.Алиев*