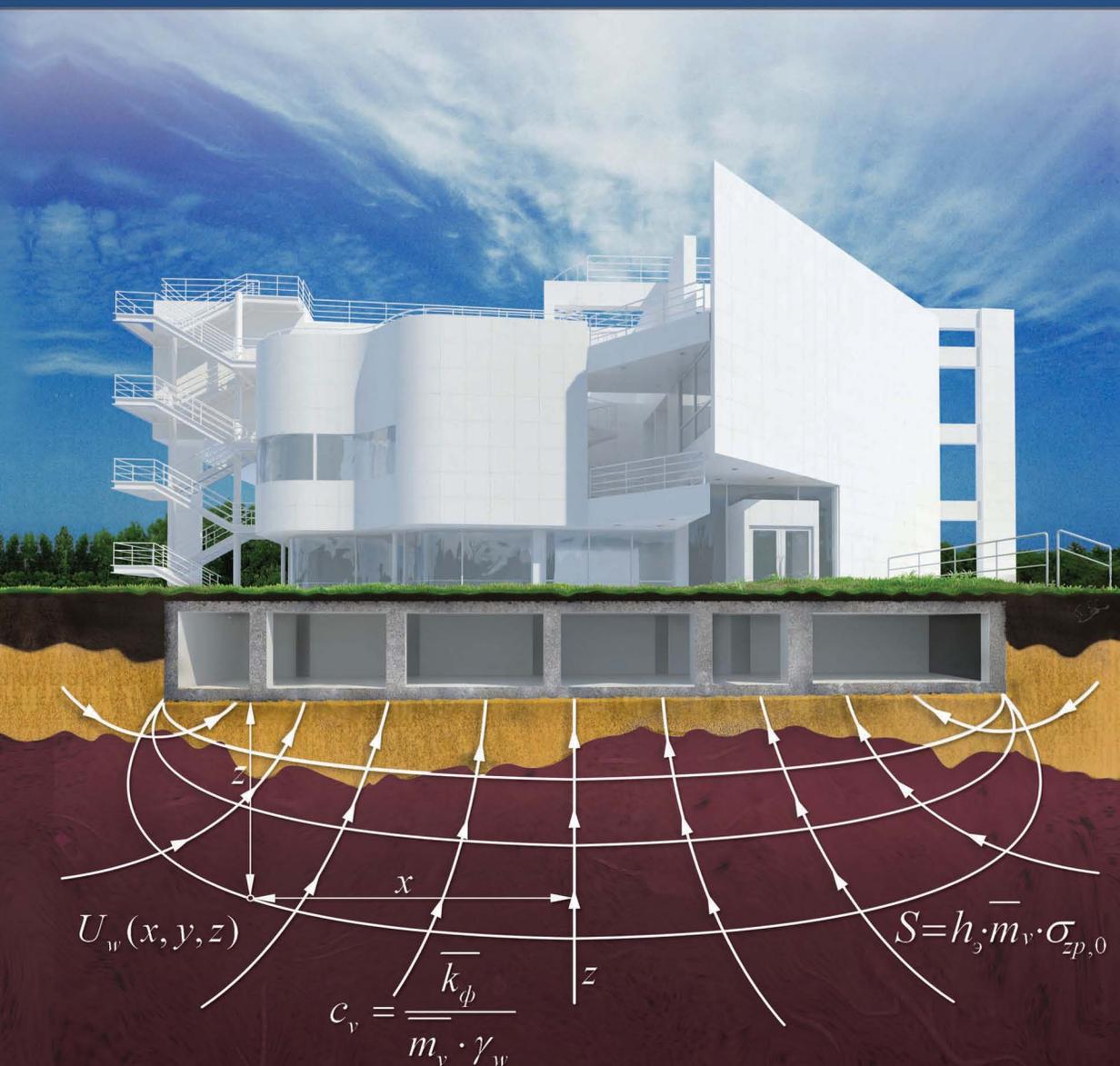


З.Г. Тер-Мартirosян

МЕХАНИКА ГРУНТОВ



З.Г. Тер-Мартirosян

МЕХАНИКА ГРУНТОВ



МГСУ
Издательство Ассоциации строительных вузов
Москва
2009

Рецензенты: Заслуженный деятель науки Российской Федерации, лауреат Государственной премии СССР, доктор технических наук, профессор *Е.А. Сорочан* (НИИОСП им. Н.М. Герсегова); академик МИА и РИА, вице-президент РОМГГиФ, лауреат Государственной премии СССР, доктор технических наук, профессор *Ю.К. Зарецкий* (Институт «Гидропроект»)

З.Г. Тер-Мартirosян

Механика грунтов / Монография. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2009. – 552 с.

ISBN 978-5-93093-376-6

В книге приведены основные сведения о происхождении грунтов, их составе и строении, а также об их физических свойствах. Рассмотрены деформационные и прочностные свойства грунтов, а также методы их изучения и описания (определяющие уравнения). Даются методы количественной оценки напряженно-деформированного состояния массивов грунтов, возникающего под воздействием внешних нагрузок и собственного веса, а также инерционных и фильтрационных сил. Рассматриваются решения ряда прикладных задач механики грунтов, в том числе для региональных видов структурно-неустойчивых грунтов.

Книга может быть полезна инженерно-техническим, научным работникам, аспирантам и студентам, специализирующимся в области прикладной механики грунтов, геомеханики и проектированием сооружений повышенной ответственности.

Рассматриваются проблемы механики грунтов в высотном строительстве, в том числе математического моделирования напряженно-деформированного состояния системы «основание – фундамент – подземная и высотная части».

The book presents principal information on genesis of soils, their composition and structure as well as their physical properties. Deformability and strength parameters of soils along with methods of their analysis and description (constitutive equations) are considered. Methods of quantitative evaluation of stress-strain state of soil massif under external loads, weight, inertial and seepage forces are given. The book contains solutions for the range of applied problems on soil mechanics including regional types of structurally unstable soils. Questions of soil mechanics in high-rise building are examined, including numerical modeling of stress-strain state of «base – foundation – underground and high-rise parts» system.

The book is intended for students graduating in civil engineering. It may be useful for engineers, technicians, researchers, students and post-graduates of applied geotechnical division and high-responsibility buildings design.

Рекомендовано Научно-техническим советом МГСУ

ISBN 978-5-93093-376-6

© Тер-Мартirosян З.Г., 2009.

© МГСУ, 2009

© Оформление.

Издательство АСВ, 2009.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Инженерная деятельность человека так или иначе связана с верхними слоями земной коры, т.е. с грунтовым массивом, служащим основанием или средой самых различных сооружений. Взаимодействие сооружений с грунтовым массивом носит сложный и пространственно-временной характер. Достоверность и точность количественной оценки такого взаимодействия во многом определяет безопасность и нормальные условия эксплуатации возводимых на них сооружений на заданный период времени. Мерой количественной оценки взаимодействия сооружений с массивом грунта является количественная характеристика напряженно-деформированного состояния (НДС), т.е. компоненты напряжений и деформаций, возникающие в грунте и подземных конструкциях сооружения. Следовательно, основной задачей механики грунтов является количественное прогнозирование НДС массивов грунтов с учетом взаимодействия с окружающей геологической средой и конструкциями сооружений, особенностей строения массива грунта. В настоящей книге предметом рассмотрения являются массивы грунтов, образованные вследствие накопления продуктов выветривания горных пород, т.е. четвертичные отложения. Вопросы механики скальных грунтов не рассматриваются, так как они излагаются в специальных курсах «Механика скальных грунтов».

Книга составлена в соответствии с программой курса «Механика грунтов», введенного в 1999 г. Министерством образования РФ для строительных вузов и факультетов в блоке общеобразовательных дисциплин. Успешное освоение курса «Механика грунтов» во многом обусловлено знанием целого цикла общеобразовательных дисциплин, таких как математика, физика, инженерная геология и гидрогеология, теории упругости, ползучести и пластичности. Пособие может быть использовано студентами и аспирантами строительных вузов, а также будет полезным инженерно-техническим и научным работникам, специализирующимся в области строительства промышленных, гражданских и энергетических сооружений, возводимых в различных инженерно-геологических и гидрогеологических условиях.

Из вышеизложенного следует, что необходимость изучения механики грунтов диктуется необходимостью решения многих проблем инженерной деятельности человека на Земле.

Автор настоящей книги стремился отразить современные положения теоретической и прикладной механики грунтов, которые необходимы будущим специалистам для их практической деятельности. В отличие от традиционных методов изложения курса механики грунтов, в книге большое внимание уделено вопросам нелинейной механики грунтов, описанию современных моделей грунтов, которые широко используются в инженерной практике благодаря численным методам расчета НДС массива с использованием современных программ для персональных компьютеров.

Вместе с тем следует отметить, что использование самих программ для решения прикладных задач не может рассматриваться как научное достижение, так как при этом забывается основа основ механики грунтов, т.е. физическая сущность решаемой задачи, правильная ее постановка и трактовка полученных результатов расчетов.

ПРЕДИСЛОВИЕ ко 2-му изданию

При подготовке этой книги для второго издания сохранены первоначальные цели и задачи первого издания – дать инженерам и научным работникам основы знаний по теоретической механике грунтов в столь простой форме, какую позволяет этот предмет, вместе с решением прикладных задач, имеющих важное значение для инженерной практики и проектирования оснований, фундаментов и подземных конструкций самых различных сооружений в сложных инженерно-геологических условиях.

В текст внесены незначительные изменения за счет исключения и перестановки, а также путем добавления главы 11. В последней отражены интенсивное развитие за последние 10 лет численных методов моделирования напряженно-деформативного состояния (НДС) массивов грунтов, вмещающих подземную часть зданий и сооружений, с учетом нелинейных свойств грунтов, слагающих рассматриваемый массив, жесткости подземной части здания, а также с учетом поэтапности воздействия подземной и надземной частей, в том числе:

- водопонижение;
- устройство ограждающих конструкций;
- выемка грунтом из котлована с устройством распорок или анкеров;
- устройство плитного или плитно-свайного фундамента;
- строительство подземной части;
- строительство надземной части.

Для этого потребовалось дать описание современных моделей грунтов, учитывающих упругопластическое деформирование, а также обзор современных компьютерных программных комплексов, необходимые для математического (численного) моделирования НДС систем «основание – фундамент – подземная и надземные части» далее «система», с учетом их взаимодействия.

Использование этих программных комплексов во многом расширяет возможности описания НДС этой «системы», что было невозможно осуществить аналитическими методами. Недостаток численных методов заключается в том, что пользователю программ нет необходимости освоения теоретических основ механики грунтов. Это часто приводит к неправильной постановке задач и неправильному анализу результатов решения этих задач. Автор этой книги имеет большой опыт общения с молодыми инженерами и ас-

пирантами, которые легко осваивают программные комплексы, не имея при этом достаточной подготовки по теоретической механике грунтов.

Более того, часто пользователи программ для идентификации полученных решений обращаются к результатам решений, полученными аналитическими методами.

Автор пользуется возможностью выразить большую благодарность академику РАН, доктору физико-математических наук, профессору С.С. Григоряну за многочисленные исправления и предложения при подготовке к изданию второй редакции настоящей монографии (главы 1–10).

ВВЕДЕНИЕ

Механика грунтов – прикладная наука, необходимая для количественной оценки НДС массивов грунтов, служащих основанием, средой и материалом самых различных сооружений. Способность грунтовой среды сопротивляться объемным изменениям и формоизменениям дает возможность отнести ее к твердым деформируемым телам и, следовательно, использовать для описания ее механических свойств и расчетов НДС хорошо разработанный аппарат механики деформируемой сплошной среды, а также механики многофазных сред.

Поэтому можно считать, что механика грунтов является разделом механики деформируемых твёрдых сред.

Механика грунтов изучает закономерности деформирования и разрушения грунтовой среды и их математическое описание, необходимое для количественной оценки НДС массивов грунтов, взаимодействующих с конструкциями наземных и подземных частей сооружений, различными методами механики деформируемой сплошной среды.

Анализ многочисленных исследований показывает, что механические свойства грунтов существенно отличаются от свойств конструкционных материалов (стали, бетона, дерева, пластмасс и др.). Грунты – это менее прочные материалы проявляющие ярко выраженные нелинейные свойства при объемном изменении и формоизменении и существенно зависящие от исходной плотности – влажности грунта, причём эти свойства могут меняться в широких диапазонах. Все это привело к необходимости разработки специальных методов исследования механических свойств грунтов и их математического описания.

Анализ многолетних исследований НДС массивов грунтов, взаимодействующих с подземными и наземными конструкциями сооружений, показывает, что процесс формирования и трансформации НДС массива под действием внешних нагрузок имеет сложный пространственно-неоднородный и временной характер. Он существенно зависит от механических свойств грунтов, слагающих рассматриваемый массив, от истории формирования этого массива, его состава и строения, геометрических форм и взаимного расположения инженерно-геологических элементов (ИГЭ) (плоско-параллельные слои,

отдельные включения, наклонные слои), от однородности и изотропности ИГЭ, технологических особенностей и масштабов строительства, условий эксплуатации сооружения и т.д. Следовательно, количественная оценка НДС массивов грунтов является сложнейшей прикладной задачей, решение которой необходимо для прогнозирования безопасности и устойчивости сооружения в период его эксплуатации.

Из вышеизложенного следует, что успешное решение прикладных задач механики грунтов существенно зависит от достоверности определения физических и механических свойств грунтов, а также от успешного применения расчетного аппарата для оценки НДС. Таким образом, «Механика грунтов» является комплексной наукой, изучающей, с одной стороны, механические свойства грунтов и описывающей эти свойства в массиве, и с другой – изучающей и оценивающей закономерности формирования и трансформации НДС массивов грунтов при взаимодействии с конструкциями сооружения и окружающей геологической средой.

Создание адекватной математической модели грунтовой среды для описания механических свойств грунтов различного происхождения и различной исходной плотности – влажности в широком диапазоне изменения НДС связано со значительными математическими трудностями. Этим и объясняются имеющиеся в современной механике грунтов многочисленные математические модели грунтов, которые применимы для определенных видов грунтов и при заданных пределах изменения НДС.

Разработка методов количественной оценки НДС массивов грунтов, возникающего под действием внешней нагрузки и собственного веса, также связана с большими математическими трудностями, особенно при решении краевых задач. Однако современные численные методы МКЭ и МКР значительно упрощают эту задачу.

Основные понятия и определения. Грунтом называются минерально-дисперсные образования – продукты выветривания горных пород, которые откладываются в верхних слоях земной коры и образуют массивы мощностью от нескольких метров до десятков и сотен метров. В зависимости от истории образования массива (его генезиса), обусловленного физико-географическими условиями, физико-механические свойства грунтов меняются в широких пределах. Массив

грунта может быть однородным (гомогенным) и изотропным, неоднородным (гетерогенным) и слоистым, может состоять из нескольких слоев и частей различной конфигурации. Поэтому в составе рассматриваемого массива в механике грунтов может находиться несколько ИГЭ.

Строение массива и физико-механические свойства грунтов каждого ИГЭ в этом массиве существенно влияют на характер исходного (природного) НДС, возникающего под действием сил гравитации и фильтрации, а также НДС, которое формируется под действием внешних статических и динамических сил. Поэтому получение достоверной информации о строении и составе массива, физико-механических свойствах грунтов, слагающих каждый ИГЭ, в том числе и о гидрогеологических условиях массива, является первостепенной задачей прикладной механики грунтов. Наряду с этими данными важной является история формирования данного массива, так как она определяет исходное НДС. По исходному НДС различают нормальноуплотненные и переуплотненные грунты. Первые представляют собой молодые образования, в которых НДС формировалось только под действием их собственного веса. Это сравнительно слабые грунты, в которых отношение вертикальных и горизонтальных напряжений больше единицы. Вторые представляют собой плотные грунты, в которых НДС формировалось под действием не только собственного веса данного массива, но и веса вышележащей, однако исчезнувшей большой толщи грунтов или ледника. Механические свойства этих двух типов грунтов существенно отличаются, и это обстоятельство необходимо учитывать в решениях прикладных задач механики грунтов.

В отличие от механики однородной сплошной среды, в механике грунтов часто приходится использовать две системы напряжений для описания НДС массива водонасыщенного грунта, т.е. напряжения, действующие в скелете (минеральном каркасе) грунта, и напряжение (давление) в поровой газосодержащей воде. Сумма этих напряжений на единице площади грунта представляет собой *тотальное напряжение*. Поскольку касательные напряжения в поровой воде незначительные и ими можно пренебречь, то сказанное относится к нормальным напряжениям. Напряжения, действующие в скелете, часто называют *эффективными напряжениями*, так как они, и только они, обус-

ловливают эффект уплотнения скелета и вызывают кулоновское трение между частицами. Напряжения, действующие в поровой воде, называют *поровым давлением*, а иногда и нейтральным давлением, так как они не влияют на трение между частицами грунта.

Необходимость использования двух систем напряжений возникает при описании нестабилизированного состояния НДС массива грунта, которое возникает всегда при приложении внешней нагрузки к водонасыщенному массиву грунта и которое через определенное время стабилизируется. В стабилизированном состоянии тотальные напряжения полностью воспринимаются скелетом грунта. В связи с этим следует помнить, что в механике грунтов в подавляющем большинстве случаев, когда говорят об НДС массива, имеют в виду *стабилизированное состояние*. *Нестабилизированное* НДС массива водонасыщенного грунта рассматривается в специальном разделе механики грунтов и *описывается уравнениями теории консолидации* грунтов. Отличительная особенность нестабилизированного НДС состоит еще и в том, что в процессе перераспределения тотальных напряжений между скелетом и поровой водой происходят изменения соотношений твердой и жидкой фаз в единице объема грунта, т.е. происходит отжатие воды из пор грунта, вследствие чего грунт уплотняется и упрочняется.

Таким образом, если противное не оговорено, мы будем рассматривать в основном стабилизированные НДС, которые проще для освоения и анализа НДС массива на первом этапе изучения механики грунтов.

Связь механики грунтов с другими науками. Механика грунтов является частью прикладной геомеханики и занимается количественным прогнозированием НДС массивов грунтов, служащих основанием, средой и материалом сооружений. Для ее освоения необходимо знание ряда наук: инженерной геологии и гидрогеологии, грунтоведения, теории упругости, пластичности и ползучести, теории фильтрации в пористой среде и др. Кроме того, необходимы знания в области строительства сооружений в сложных инженерно-геологических условиях, в области конструкций фундаментов и подземных частей сооружений и, наконец, в области технологии строительного производства нулевого цикла.

Основные задачи механики грунтов дать правильную оценку инженерно-геологической обстановки строительной площадки с учетом особенностей проектируемого сооружения и конструкции его подземной части и на этой основе строить алгоритм решения соответствующих задач. Правильный выбор алгоритма расчетной модели грунтов в целом для теоретического или численного прогнозирования НДС массива во многом обеспечивает успешное решение прикладных задач механики грунтов. Сложность решения этих задач связана с особенностями характера взаимодействия массива с подземной частью сооружения, обусловленного большой сжимаемостью (до 10% и более) грунтов и незначительной, в 100 и более раз меньшей, их прочностью в сравнении с прочностью конструкционных материалов, контактирующих с массивом. Неправильное представление и прогнозирование НДС массива может привести к негативным явлениям вплоть до аварий. Поэтому при глубоком изучении механики грунтов читатели должны уметь:

- правильно оценить инженерно-геологическую и гидрогеологическую обстановку строительной площадки, в том числе физико-механические свойства грунтов, слагающих массив;
- дать количественную оценку НДС массива с помощью теоретических или численных методов и правильно прогнозировать направление развития геомеханических процессов в период строительства и эксплуатации сооружения;
- совместно с инженером-конструктором разработать такую конструкцию подземной части сооружения и такую технологию производства работ, которые позволили бы минимизировать негативные явления и обеспечить надежность и безопасность возводимого сооружения.

Краткий обзор развития механики грунтов.

Механика грунтов как прикладная наука окончательно сформировалась в начале XX в., когда возникла необходимость количественного прогнозирования геомеханических процессов в массивах грунтов, взаимодействующих с сооружениями. Бурное развитие строительства, в том числе строительства тяжелых сооружений, во всех отраслях привело к необходимости обеспечения их надежности и долговечности с учетом сложных инженерно-геологических усло-

вий. В основу формирования механики грунтов легли фундаментальные исследования в области механики деформируемого твердого тела, выполненные в XIX и XX вв., а также в области геологии и гидрогеологии. В этой связи следует отметить работы иностранных ученых Ш. Кулона, Г. Дарси, Е. Винклера, Ж. Буссинеска, М. Леви, Д. Дрункера, В. Прагера, Л. Прандтля, К. Терцаги и российских ученых В.М. Корловича, Н.М. Герсеванова, Н.А. Цытовича, Н.Н. Маслова, В.А. Флорина, Е.М. Сергеева, Н.Я. Денисова и др.

Большое влияние на формирование механики грунтов как учебной дисциплины оказал учебник Н.А. Цытовича (1934 г.), который переиздавался семь раз вплоть до 1983 г. и переводился на многие (7) языки мира.

Значительному развитию теоретической и прикладной механики грунтов в СССР, а в последнее время в России, способствовали работы А.К. Бугрова, В.Г. Березанцева, С.С. Вялова, А.И. Боткина, М.Н. Гольдштейна, С.С. Григоряна, Б.И. Дидука, М.И. Горбунова – Посадова, К.Е. Егорова, Г.М. Ломизе, Ю.К. Зарецкого, М.В. Малышева, П.Л. Иванова, В.А. Ильичева, А.Л. Гольдина, В.Н. Николаевского, Г.И. Тер-Степаняна, С.Р. Месчяна, Е.А. Сорочана, В.В. Соколовского, Л.Н. Рассказова и многих других.

В настоящее время механика грунтов представляет собой раздел геомеханики и механики сплошной среды с развитой экспериментальной базой и мощным механико-математическим аппаратом, способным решать самые сложные задачи взаимодействия сооружений и массивов грунтов, аналитическими и численными методами.

Современные численные методы расчета НДС массивов грунтов с любой неоднородностью строения и при любом виде нелинейных соотношений (физических и геометрических) в значительной степени расширили возможности теоретической и прикладной механики грунтов. Они позволяют не только решать конкретные практические задачи, но и поставить и проанализировать математически эксперимент с учетом особенностей деформирования и разрушения грунтов, их взаимодействия с конструкциями и т.п. Иногда такие эксперименты невозможно осуществить в натуре по техническим причинам или по экономическим соображениям.

Значение механики грунтов (геомеханики) в инженерной практике. Инженерная деятельность человека в верхних слоях земной коры связана не только с крупномасштабным строительством тяжелых промышленных и высокоэтажных гражданских и энергетических сооружений (ГЭС, ТЭС, АЭС), но также с устройством глубоких котлованов, откачкой подземных вод, строительством транспортных и линейных сооружений. Масштабы такой инженерной деятельности в верхних слоях земной коры иногда достигают глубин в несколько десятков и сотен метров, и это может оказывать и оказывает сильное влияние на окружающую геологическую среду. Поэтому в настоящее время задачи, решаемые механикой грунтов, значительно сложнее, чем в начале XX в.. Механика грунтов расширила свои возможности и в некоторых случаях решает задачи прикладной геомеханики в строительстве [60]. В настоящей книге глобальные задачи прикладной геомеханики будут рассмотрены лишь в тех случаях, когда они связаны с решением конкретных задач крупномасштабного строительства, например при высотном строительстве.

Сегодня невозможно представить решение проблем строительства без использования достижений механики грунтов, так как они, и только они, дают возможность количественно оценить характер взаимодействия сооружений с массивом грунта и прогнозировать направления развития геомеханического процесса в массиве, что необходимо для обеспечения надежности и долговечности сооружений.

Глава 1. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРУНТОВ

1.1. Общие положения

Физические свойства грунтов определяются в основном их *плотностью, влажностью*, гранулометрическим составом твердых минеральных частиц и физико-химическим составом воды в порах. Эти свойства формируются по-разному, в зависимости от физико-географических условий их формирования в течение многих тысяч и миллионов лет. Изучением закономерностей формирования физических свойств грунтов как продуктов выветривания горных массивно-кристаллических пород занимается специальная наука о земле – грунтоведение. Для решения многих прикладных инженерных задач строительства в первую очередь возникает необходимость определения физических свойств грунтов на строительной площадке, от которых во многом зависят и механические свойства грунтов (деформируемость и прочность). В свою очередь, механические свойства грунтов на строительной площадке в основном определяют конструктивные особенности фундаментов проектируемого здания или сооружения. Вот почему необходимо изучение физических свойств грунтов в зависимости от условий их формирования.

1.2. Происхождение грунтов

Следуя Н.А. Цытовичу, *грунтом мы называем природные минерально-дисперсные образования коры выветривания литосферы*, за исключением массивно-кристаллических и трещиноватых горных (скальных) пород.

Грунты по своему происхождению подразделяются на континентальные и морские осадочные образования, которые относят к молодым четвертичным отложениям. К континентальным отложениям относятся: *аллювий*, перенесенный речными потоками; *делювий*, отложенный на склонах вблизи места выветривания; *элювий*, залегающий на месте своего возникновения; *эоловые* отложения, переносимые на значительные расстояния воздушными потоками; *ледниковые и водно-ледниковые* отложения, которые образовались в период оледенения и таяния ледников. К *морским* отложениям относятся глины или ракушечники, которые содержат большое количество солей.

Осадочные грунты состоят в основном из первичных (кварц, полевые шпаты, слюда, кремь, авгит и др.) и вторичных (монтмориллонит, иллит, каолинит и др.) минералов, которые образовались в

процессе разрушения, выветривания горных пород, а также солей (сульфаты, карбонаты) и органических веществ. К осадочным относятся крупнообломочные, песчаные, глинистые, лессовые, набухающие, илистые, заторфованные и другие грунты.

1.3. Состав грунтов

В состав грунтов входят твердые частицы, вода в различных видах и состояниях, в том числе лёд, а также газы и воздух. В зависимости от количественных соотношений составных частей в единице объема грунта, гранулометрического состава твердых частиц, их формы, размеров и окатанности его физические и механические свойства меняются в широких пределах – от слабых водонасыщенных глинистых до крупнообломочных плотных грунтов.

Твердые частицы грунтов состоят из грунтообразующих минералов, они имеют различные формы, размеры и окатанность и в совокупности образуют пространственную структуру (каркас, скелет) грунта, способный сопротивляться объемным изменениям и формоизменениям, как и все твердые тела. Кварц, полевые шпаты, слюда, кремень и другие минералы – *гидрофобны* и не меняют свои свойства в водной среде. Кроме того, связь между частицами этих минералов практически отсутствует, и поэтому грунты, состоящие из них, называют несвязными. К ним относятся крупнообломочные и песчаные грунты.

Следует, однако, отметить, что угол внутреннего трения несвязных грунтов частично зависит от их увлажнения. Кроме того, в песчаных грунтах при их увлажнении возникает и некоторое сцепление, которое обусловлено капиллярным давлением.

Свойства несвязных грунтов во многом зависят от их гранулометрического состава, крупности, окатанности частиц и других факторов. При однородном (гомогенном) строении этих грунтов их свойства зависят только от минералогического состава, крупности и окатанности частиц (пример – кварцевый песок). При неоднородном (гетерогенном) строении несвязных грунтов, содержащих частицы грунта различного размера, физико-механические их свойства существенно зависят от гранулометрического состава, содержания крупных фракций (песчано-гравелистая смесь). Свойства гетерогенных грунтов, в том числе и гравелистых грунтов с песчаным или глинистым заполнителем, следует определять по специальной методике. Если же крупнообломочные грунты составляют незначительную часть одно-

родных песчаных или глинистых вмещающих грунтов, то и в этом случае следует определять их свойства по специальной методике.

Глинистые минералы в большинстве случаев *гидрофильны*. Это обусловлено их поверхностной активностью по отношению к воде. Глинистые минералы (каолинит, монтмориллонит, иллит, аттапульгит) имеют пластинчатую или игольчатую форму, причем размеры кристаллов не превышают 1–2 мкм, а отношение длины к толщине превышает десятки раз. В связи с этим они имеют огромную удельную поверхность ($\text{м}^2/\text{г}$). Так, например, 1 г монтмориллонита имеет суммарную поверхность 800 м^2 , а в 1 г каолинита суммарная поверхность составляет 10 м^2 . Содержание глинистых минералов оказывает существенное влияние на свойства грунтов, и в первую очередь – на характер связности грунтов. Поэтому грунты, содержащие глинистые фракции, такие как глины, суглинки и супеси, называются связными грунтами. Взаимодействие глинистых минералов с водой, обусловленное электрмолекулярными силами, возникающими на поверхности минералов и воздействующими на диполи воды, играет огромную роль в формировании свойств глинистых грунтов.

Немаловажную роль играют в формировании свойств грунтов растворимые в воде минералы, такие, как NaCl, гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, кальцит CaSO_3 , и др. Так, например, лессовые просадочные и набухающие глинистые грунты обладают специфическими свойствами благодаря наличию этих минералов в их составе.

В сухом состоянии частицы лессового грунта скреплены растворимыми минералами, поэтому при его увлажнении эти связи разрушаются, грунт теряет свою структурную прочность, становится пластичным, и это приводит к просадкам под нагрузкой, а иногда и под собственным весом.

Органические вещества: в грунтах органоминерального образования (торфы, илы, заторфованные грунты) содержится большое количество органики. В них процесс превращения органических веществ в неорганическое вещество может длиться долгое время, в том числе продолжается и в настоящее время. В обычных грунтах у поверхности земли органические вещества находятся в виде микроорганизмов, корней растений и гумуса. Наличие органических веществ также влияет на физико-механические свойства грунтов, особенно если их содержание велико.

Вода в грунтах играет огромную роль при формировании их физико-механических свойств. Это влияние особенно сильно проявля-

ются в глинистых грунтах, так как глинистые минералы гидрофильны и притягивают к своей поверхности диполи воды. Чем больше глинистых минералов, тем больше связанной воды в глинистых грунтах. Однако вода в грунтах может находиться в различных видах и состояниях. Согласно А.Л. Лебедеву, П.А. Ребиндеру, Е.М. Сергееву, В.И. Осипову, Н.А. Цытовичу и другим ученым, вода в грунтах находится в кристаллизационном (химически связанном), связанном и свободном состояниях. При отрицательной температуре вода в порах может полностью или частично переходить в твердое состояние (в лед).

Кристаллизационная вода находится в строении кристаллических решеток минералов, т.е. внутри частиц грунта, и ее можно удалить только путем длительного нагревания, что приводит к разложению самих минералов и к изменению свойств грунта.

Наибольший интерес для механики грунтов представляет вода в порах грунта, которая является химическим раствором слабой концентрации. Взаимодействие воды с ионами поверхностного слоя глинистых минералов и с ионами растворенных в ней веществ приводит к ориентации молекул (диполей воды) к поверхности частиц и к катионам в поровой воде.

Электрическое поле вблизи поверхности частиц обусловлено наличием неуравновешенных электронов, и это притягивает к их поверхности катионы порового раствора, образуя там диффузные оболочки. По мере удаления от поверхности частиц силы электромолекулярного взаимодействия падают, концентрация катионов уменьшается, а концентрация анионов увеличивается, вследствие чего сила притяжения молекул воды поверхностью частиц существенно ослабевает (рис. 1.1).

Молекулы воды у поверхности глинистых минералов

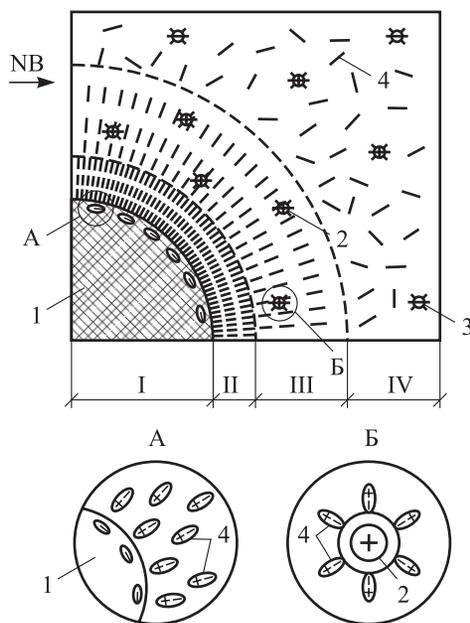


Рис. 1.1. Схема взаимодействия частиц с водой:

I – твердая частица, II – прочно связанная вода, III – рыхлосвязанная вода, IV – свободная вода; 1 – частица; 2 – катионы; 3 – анионы; 4 – молекула воды

испытывают огромное притяжение, эквивалентное напряжению в сотни МПа, и образуют так называемый слой *прочной связанной* воды. Свойства ее существенно отличаются от свойств связанной воды, в том числе плотность (1,2–2,4 г/см³), вязкость, температура заморозки (до –10 °С) и проч.

В водонасыщенном глинистом грунте толщина диффузного слоя зависит от уплотняющей нагрузки, так как она уравнивается силой отталкивания частиц глин, обусловленной увеличением концентраций катионов в контактной области. С ростом нагрузки вода в контактной области отжимается и концентрация ионов увеличивается. При снятии нагрузки процесс происходит в обратном направлении, и частицы раздвигаются за счет притока воды в контактную зону, и концентрация ионов снижается.

Следует отметить, что при изменении химического состава раствора в поровой воде может измениться и толщина диффузного слоя. Это обстоятельство часто используется для изменения свойств глинистых грунтов, в частности при устранении набухаемости глин. Изменяя свойства глинистых минералов путем специальной обработки, можно, наоборот, увеличить их набухаемость в десятки раз. Такой способ обработки глинистых минералов разработан в Институте механики МГУ академиком РАН С.С. Григоряном и его коллегами и широко используется в инженерной практике для создания противofильтрационных элементов и для других целей.

Последующие слои молекул воды менее связаны и образуют *рыхло-связанную* воду. С удалением от поверхности частиц силы притяжения ослабевают и определяющим становится тепловое движение молекул воды и ионов раствора в слое свободной воды. Этот слой может передвигаться в поровом пространстве грунта под действием гидравлического градиента и подчиняется законам фильтрации. Свободную воду часто делят на гравитационную и капиллярную. В крупнообломочных, крупнозернистых песчаных грунтах преобладает гравитационная вода. Капиллярная вода находится выше уровня грунтовых вод и содержится в мелкозернистых песчаных и глинистых грунтах. Высота столба капиллярной воды существенно зависит от гранулометрического состава грунта и колеблется от нескольких сантиметров в крупнозернистых песках до нескольких метров в суглинках. В плотных глинах в силу отсутствия свободной воды капиллярная вода может отсутствовать. Вода в пределах столба капилляра испытывает растяжение – понижение давления за счет образования мениска (рис. 1.2, а), равное весу столба воды, т.е. $P_k = \gamma_w \cdot h_k$.

Такое же давление испытывают частицы грунта вокруг капилляров, составляющие скелет грунта, но противоположного знака. В неполностью водонасыщенных грунтах на контакте минералов также образуются мениски воды и возникают силы притяжения частиц друг к другу (рис. 1.2, б). В результате по всему объему грунта создается всестороннее сжатие или связность, например, в песчаных грунтах.

Следует отметить, что интенсивность капиллярного давления зависит от кривизны менисков, которая, в свою очередь, зависит от химического состава воды и минеральных частиц (смачиваемости), а также от процесса испарения воды с поверхности грунта, т.е. от влажности окружающей среды.

Знание физико-химических особенностей взаимодействия твердых частиц с поровой водой в грунте позволяет во многом объяснить особенности поведения глинистого грунта под нагрузкой и разработать мероприятия по изменению этого поведения.

Газообразная составляющая грунта находится в свободном или в растворенном в воде состоянии. Свободный газ подразделяется на незащемленный и сообщающийся с атмосферой (сухие пески, грунты выше уровня грунтовых вод) и защемленный, находящийся в поровом пространстве между пленками воды в виде пузырьков, насыщенных парами воды. Растворенный газ всегда присутствует в грунтовой воде в соответствии с общеизвестным законом Клайперона – Менделеева – Генри о растворимости газов в жидкости. Объемы растворенного газа и пузырьков газа связаны между собой и зависят от изменения атмосферного давления и гидростатического давления на данной глубине. При изменении атмосферного и особенно гидро-

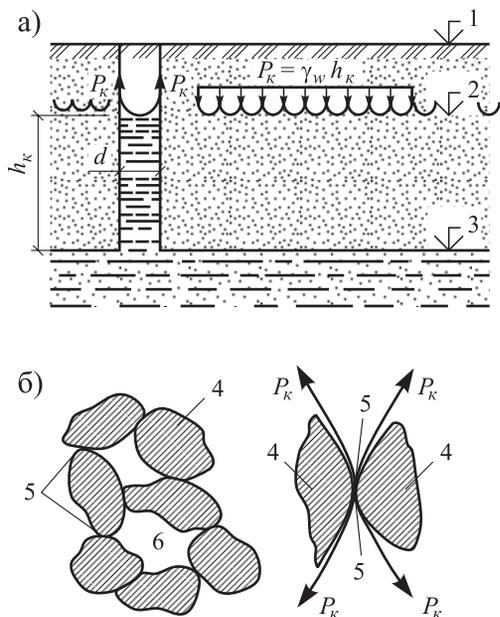


Рис. 1.2. Капиллярная вода в грунтах (а), взаимодействие капиллярной воды с минеральными частицами (б):

1 – поверхность грунта, 2 – поверхность капиллярной каймы над грунтовыми водами, 3 – уровень подземных вод, 4 – частица, 5 – вода, 6 – газ

статического давлений часть растворенного воздуха может переходить в пузырьки воздуха (как при открывании бутылки шампанского) и наоборот. Поэтому извлечение образцов глинистого грунта с больших глубин на поверхность приводит к их разрушению вследствие расширения пузырьков воздуха.

Содержание в грунте пузырьков и растворенного воздуха оказывает существенное влияние на физико-механические свойства грунтов. В частности, оно определяет объемную сжимаемость поровой воды, соизмеримую со сжимаемостью скелета грунта, а это приводит к снижению коэффициентов порового давления и фильтрации.

Скорость распространения сейсмических волн также зависит от содержания в грунте воздуха, что в конечном итоге отражается на балльности строительных площадок, сложенных грунтами, содержащими заземленный газ.

При кратковременном статическом и динамическом воздействиях на грунты заземленный в поровой воде воздух существенно влияет на распределение тотальных напряжений между скелетом и поровой водой. Чем меньше пузырьков воздуха в грунте, тем большая часть напряжений приходится на долю поровой воды, так как объемная жесткость воды при этом увеличивается. К этому вопросу мы еще неоднократно будем возвращаться в последующих разделах настоящей книги при рассмотрении конкретных задач механики грунтов.

Таким образом, состав грунтов оказывает существенное влияние на их физико-механические свойства, и это обстоятельство необходимо учитывать при рассмотрении конкретных прикладных задач механики грунтов. Разумеется, при рассмотрении задач, связанных с особыми видами грунтов (мерзлые, оттаивающие, просадочные, лессовые, набухающие и органоминеральные), также следует учитывать их состав и строение, что является предметом особых исследований. Этим вопросам будет посвящён специальный раздел (гл. 7) .

1.4. Строение, структура и текстура грунтов

Структура грунта определяется размерами, формой частиц грунта, их количественным соотношением в единице объема. Форма твердых частиц может быть угловатой и округлой, длинной и чешуйчатой. Последние встречаются в глинистых грунтах. В крупнообломочных грунтах чаще всего встречаются угловатые формы частиц, глыбы, щебень, дресва и окатанные формы частиц, валуны, галька и

гравий. Грунты в условиях естественного залегания состоят из совокупностей частиц разного размера, и поэтому в зависимости от размера частиц они подразделяются на крупнообломочные (размеры частиц от 2 мм до 200 мм), песчаные (от 0,05 мм до 2 мм) и пылевато-глинистые (от 0,05 мм до 0,005 мм и менее). В зависимости от процентного соотношения (по массе) в единице объема того или иного размера частиц грунты подразделяются на типы (*табл. 1.1*), в том числе на крупнообломочные – глыбовый (валунный), щебенистый (галечниковый), дресвяный (гравийный); песчаные – гравелистый, крупный, средний, мелкий, пылеватый. Содержание глинистых фракций в крупнообломочных и песчаных грунтах не превышает 3%.

Таблица 1.1

Классификация частиц грунта по размерам

Наименование частиц	Размеры частиц, мм
<i>Крупнообломочные</i>	
Глыбы и валуны	Более 200
Щебень и галька	200...10
Дресва и гравий	10...2
<i>Песчаные</i>	
Крупные	2...0,5
Средние	0,5...0,25
Мелкие	0,25...0,10
Тонкие	0,10...0,05
<i>Глинистые</i>	
Пылеватые	0,05...0,005
Глинистые	Менее 0,005

А вот пылевато-глинистые грунты в зависимости от содержания в них частиц глинистых фракций подразделяются на супеси – от 3 до 10%, суглинки – от 10 до 30% и глины – более 30%.

Состав грунта оказывает существенное влияние на его механические свойства. Поэтому для количественной оценки гранулометрического состава грунта строят интегральную кривую распределения зерен грунта по размерам, т.е. кривую гранулометрического (зернового) состава (*рис. 1.3*).

Оглавление

Предисловие.....	3
Введение.....	7
Глава 1. Физические свойства грунтов.....	14
1.1. Общие положения	14
1.2. Происхождение грунтов	14
1.3. Состав грунтов.....	15
1.4. Строение, структура и текстура грунтов.....	20
1.5. Структурные связи в грунтах	24
1.6. Характеристики физического состояния грунтов	26
1.7. Классификационные показатели грунтов	32
1.8. Структурно-неустойчивые грунты.....	35
Глава 2. Механические свойства грунтов	36
2.1. Общие положения	36
2.2. Деформируемость грунтов	37
2.3. Водопроницаемость и влагопроводность грунтов ...	50
2.4. Прочность грунтов	61
2.5. Полевые методы определения параметров механических свойств грунтов.....	78
2.6. Эквивалентные характеристики деформируемости и прочности многокомпонентного грунта	91
Глава 3. Основные положения и задачи механики грунтов ...	108
3.1. Особенности строения грунтовой среды.....	108
3.2. Основные задачи механики грунтов.....	111
3.3. Основные соотношения механики сплошных сред.....	112
Глава 4. Определяющие соотношения механики грунтов	123
4.1. Общие положения	123
4.2. Линейно-деформируемая грунтовая среда.....	125
4.3. Нелинейно-деформируемая грунтовая среда.....	129
4.4. Определяющие соотношения поровой воды грунтов.....	153
4.5. Реологические свойства грунтов и описывающие их уравнения	159

Глава 5. Напряженно-деформированное состояние (НДС) массивов грунтов (стабилизированное состояние)....	171
5.1. Основные положения. Геомеханические модели массивов грунтов	171
5.2. Исходное (природное) НДС массивов грунтов	172
5.3. НДС однородных массивов грунтов под действием нагрузки на их границе и внутри них	192
5.4. НДС массивов грунтов ограниченных размеров.....	216
5.5. НДС массивов, сложенных из нелинейно-деформируемых грунтов.....	230
5.6. Об остаточных и внутренних напряжениях в грунтах	232
5.7. Замечания по задаче Фламана	240
Глава 6. НДС водонасыщенных массивов грунтов (нестабилизированное состояние)	242
6.1. Общие положения	242
6.2. Начальная стадия формирования НДС водонасыщенного массива грунта.....	244
6.3. Промежуточная стадия формирования НДС водонасыщенного массива грунта.....	248
6.4. Некоторые решения одномерной задачи консолидации и ползучести грунтов	253
6.5. Осесимметричные задачи консолидации и ползучести грунтов.....	280
6.6. Плоская и пространственная задачи консолидации и ползучести грунтов	300
Глава 7. НДС массивов структурно-неустойчивых грунтов ..	316
7.1. Общие положения	316
7.2. Лессовые просадочные грунты	320
7.3. Набухающие глинистые грунты	350
7.4. Мерзлые и оттаивающие грунты	380
7.5. Рыхлые песчаные грунты	389
Глава 8. Предельное напряженное состояние массивов грунтов	392
8.1. Общие положения	392

8.2. Основные положения теории предельного равновесия	394
8.3. Критические нагрузки на основания сооружений....	395
8.4. Устойчивость и ползучесть склонов и откосов	412
8.5. Давление грунтов на ограждающие конструкции....	431
Глава 9. Контактные задачи механики грунтов	437
9.1. Общие положения	437
9.2. Контактные напряжения под абсолютно жесткими фундаментами	441
9.3. Контактные напряжения по подошве конструкций и сооружений конечной жесткости....	447
9.4. Контактные напряжения массива грунта с конструкциями высотных зданий	457
Глава 10. Динамические задачи механики грунтов	470
10.1. Особенности динамических воздействий на основания сооружений.....	470
10.2. Механические свойства грунтов при динамических воздействиях.....	471
10.3. Взаимодействие оснований и фундаментов под машинами и оборудованием с динамическими нагрузками.....	482
10.4. Сейсмостойкость массивов грунтов	488
10.5. Механические свойства при низкочастотных циклических воздействиях	497
Глава 11. Проблемы механики грунтов в высотном строительстве.....	501
11.1. Введение	501
11.2. Особенности инженерно-геологических испытаний.....	502
11.3. Влияние различных факторов на НДС оснований высотных зданий, возводимых в глубоких котлованах	514
11.4. Некоторые результаты расчётов	528
11.5. Заключение.....	532
Список литературы	541

Contents

Preface	3
Introduction.....	7
Chapter 1. Physical properties of soils.....	14
1.1. General statements.....	14
1.2. Origin of soils	14
1.3. Soil composition	15
1.4. Structure and texture of soils.....	20
1.5. Structural bonds in soils	24
1.6. Characteristics of physical state of soils	26
1.7. Classification of soils	32
1.8. Structurally unstable soils	35
Chapter 2. Mechanical properties of soil.....	36
2.1. General statements.....	36
2.2. Deformability of soils.....	37
2.3. Permeability and humidity of soils.....	50
2.4. Soil strength.....	61
2.5. In situ determination of mechanical properties of soils	78
2.6. Equivalent parameters of deformability and strength of multi-component soil.....	91
Chapter 3. Fundamental statements and problems of soil mechanics.....	108
3.1. Peculiarities of soil mass structure	108
3.2. Fundamental problems of soil mechanics	111
3.3. Fundamental correlations of soil mechanics	112
Chapter 4. Constitutive laws of soil mechanics.....	123
4.1. General statements.....	123
4.2. Linear-elastic soil stratum	125
4.3. Non-linear deformed soil stratum.....	129
4.4. Constitutive correlations for pore pressures.....	153
4.5. Rheologic properties and correspondent equations.....	159

Chapter 5. Stress-strain state of soil massif (stabilized conditions)	171
5.1. Basic statements. Geomechanical models of soil massif.....	171
5.2. Initial stress-strain state of soil massif	172
5.3. Stress-strain state of homogeneous soil massif under boundary and internal loads.....	192
5.4. Stress-strain state of limited size soil massif.....	216
5.5. Stress-strain state of non-linear deformed soil massif..	230
5.6. Residual and internal stresses in soils	232
5.7. Comments on Flaman’s problem.....	240
Chapter 6. Stress-strain state of saturated soil massif (unstabilized condition)	242
6.1. General statements.....	242
6.2. Initial stage of stress-strain state of saturated soil massif.....	244
6.3. Intermediate stage of stress-strain state of saturated soil massif	248
6.4. Some solutions for one-dimensional problem of soil consolidation and creep	253
6.5. Axis-symmetric problems of soil consolidation and creep.....	280
6.6. Two- and three-dimensional problems of soil consolidation and creep	300
Chapter 7. Stress-strain state of structurally unstable soil massif	316
7.1. General statements.....	316
7.2. Collapsible loess soils	320
7.3. Swelling clay soils.....	350
7.4. Frozen and melting soils.....	380
7.5. Lose sand soils.....	389
Chapter 8. Limit state conditions of soil massif.....	392
8.1. General statements.....	392

8.2. Basic statements of limit state theory	394
8.3. Critical loads on soil bases	395
8.4. Stability and creep of slopes.....	412
8.5. Soil pressure on retaining structures	431
Chapter 9. Interaction problems in soil mechanics	437
9.1. General statements.....	437
9.2. Stresses in soil on the contact with ideally rigid foundation	441
9.3. Stresses in soil on the contact with deformed foundation	447
9.4. Stresses on the contact of soil and constructions of high-rise buildings.....	457
Chapter 10. Dynamic problems of soil mechanics.....	470
10.1. Specifics of dynamic influences on soil massif.....	470
10.2. Mechanical properties of soils under dynamic loads ..	471
10.3. Interaction of soils and foundations under equipment with dynamic loads	482
10.4. Seismic stability of soil massif.....	488
10.5. Mechanical properties under cyclic influences of low frequency.....	497
Chapter 11. Soil mechanics problems in high-rise building	501
11.1. Introduction	501
11.2. Engineering-geological exploration features.....	502
11.3. Various factors influence on stress-strain state of high-rise buildings bases, raised in deep foundation pits.....	514
11.4. Some calculation results	528
11.5. Conclusion.....	532
Bibliographical list.....	541

Об авторе



Автор учебного пособия – Завен Григорьевич Тер-Мартirosян, академик АБН РФ и Нью-Йоркской АН, заслуженный деятель науки РФ, почетный строитель РФ и г. Москвы, почетный энергетик РФ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механики грунтов, оснований и фундаментов Московского государственного строительного университета (МГСУ-МИСИ).

Профессор З.Г. Тер-Мартirosян – известный специалист в области теоретической и прикладной геомеханики в строительстве.

В руководимой им Лаборатории прикладной геомеханики МГСУ разработана комплексная программа (экспериментальная и теоретическая), необходимая для количественной оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) массивов грунтов, служащих основанием и средой различных сооружений. Эта лаборатория в течение последних 35 лет проводит научное сопровождение проектов крупномасштабного и высотного строительства в республиках СНГ, РФ и в г. Москве.

Проф. З.Г. Тер-Мартirosян – автор и соавтор пяти монографий, трёх учебных пособий, более 220 печатных работ и 39 изобретений. Его монография «Реологические свойства грунтов и проектирование оснований сооружений» переведена на английский язык и издана в издательстве Оксфордского университета в 1992 г. За 35 лет работы в МГСУ он подготовил 47 кандидатов технических наук, в том числе 22 иностранца, а при его консультации защищены 6 докторских диссертаций.

Профессор З.Г. Тер-Мартirosян выполняет большую общественную работу, руководит постоянно действующим (ежемесячно) семинаром по теоретической и прикладной механике грунтов при МГСУ, соучредителями которого являются: Институт механики МГУ, РУДН, Гидропроект, НИИОСП, МГСУ, Институт геоэкологии РАН; является председателем специализированного совета по присуждению ученых степеней доктора и кандидата технических наук по специальностям «Основания, фундаменты и подземные сооружения», «Геомеханика прикладная» и «Геотехнология строительная»; является членом президиума Российского общества по механике грунтов, геотехнике и фундаментостроению (РОМГГиФ); председателем Московского регионального отделения РОМГГиФ, который входит в состав Международного общества МОМГГиФ (JSSMGE); является действительным членом Международного института инженеров-строителей (Англия); членом редколлегии журнала «Основания, фундаменты и механика грунтов»; экспертом московских городских технических комиссий, в том числе по основаниям, фундаментам и подземным сооружениям.

Научное издание

Завен Григорьевич Тер-Мартirosян

МЕХАНИКА ГРУНТОВ

Редактор: *В.Ш. Мерзлякова*

Верстальщик: *Е.М. Лютова*

Компьютерный дизайн обложки: *Н.С. Романова*

Лицензия ЛР № 0716188 от 01.04.98.

Подписано к печати 5.11.09. Формат 70x100 1/16

Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.

Усл. 34,5 п.л. Тираж 500 экз. Заказ №

Издательство Ассоциации строительных вузов (АСВ)
129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, отдел реализации – оф. 511
тел., факс: (499)183-56-83, e-mail: iasv@mgsu.ru, <http://www.iasv.ru/>