



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
**СТРОИТЕЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

**«Национальный исследовательский
Московский государственный строительный университет»**

Кафедра «Механика грунтов и геотехника»
Научно-образовательный центр «Геотехника»

Теоретические основы механики грунтов



*Профессор кафедры механики грунтов и геотехники,
главный научный сотрудник НОЦ «Геотехника»
д.т.н., профессор, лауреат премии Правительства РФ*

Тер-Мартirosян Завен Григорьевич

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 твердых 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,



$$HDC = f(P, W, UГ, E, \gamma, \varphi, c)$$

$$HDC \rightarrow \sigma_{ij}(z), \varepsilon_{ij}(z), u, v, w(z) = 15 \text{ неиз-х!}$$

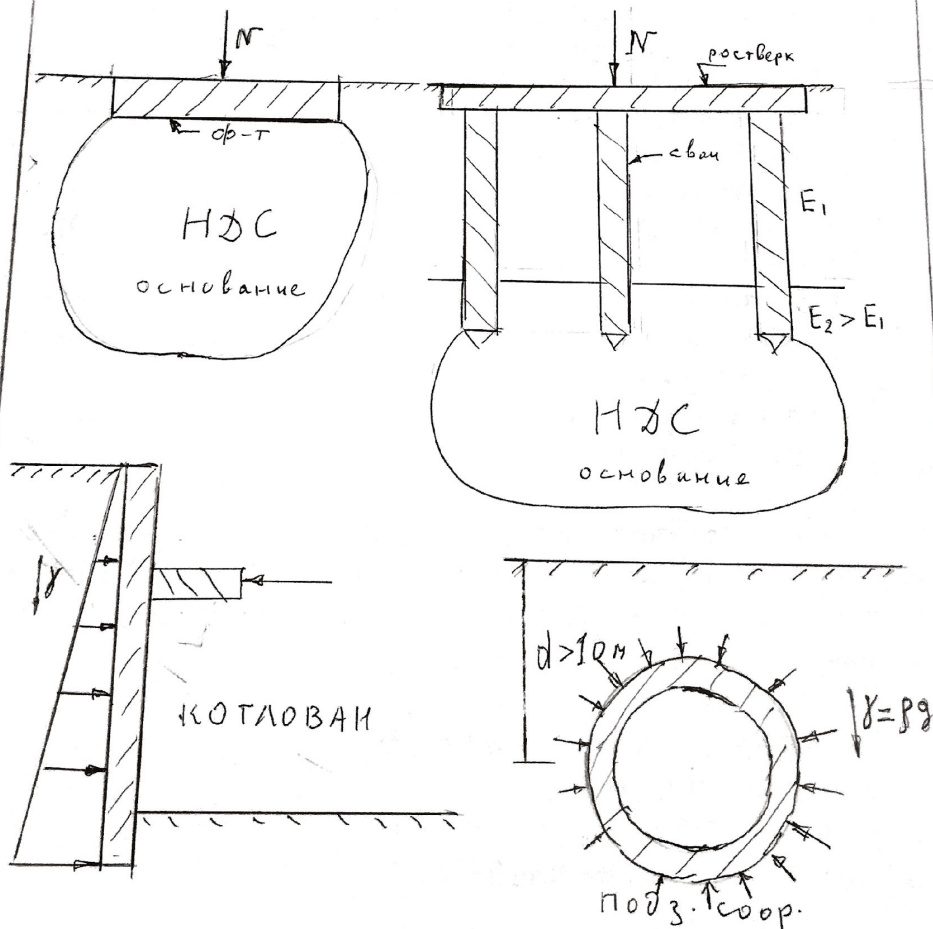
НЭОБХ-МО 3-ур. равн., 6 ур. неизв. 6 ур. физ.

В условиях плоской задачи! $\sigma_x, \sigma_y, \gamma_{xy}$

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}, u, v$ - всего 8 неизв.

Необх. 2-ур. равн. 3 ур. физ. 3-ур. совм.

об этом позже!





Физические уравнения

Гук

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z))$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z))$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} (\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y))$$

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x - \sigma_m}{2G} + \frac{\sigma_m}{K}; \quad \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y - \sigma_m}{2G} + \frac{\sigma_m}{K}; \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}$$

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z - \sigma_m}{2G} + \frac{\sigma_m}{K}; \quad \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G}$$

Генки

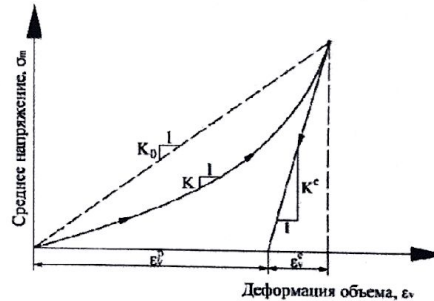
$$\varepsilon_x = \chi(\sigma_x - \sigma_m) + \chi^* \sigma_m; \quad \gamma_{xy} = 2\chi\tau_{xy};$$

$$\varepsilon_y = \chi(\sigma_y - \sigma_m) + \chi^* \sigma_m; \quad \gamma_{yz} = 2\chi\tau_{yz};$$

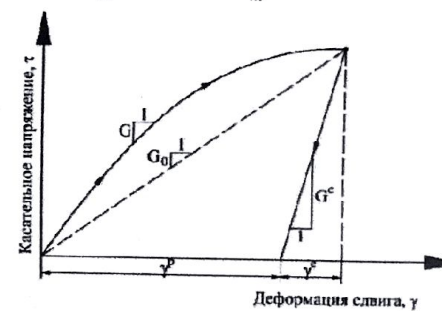
$$\varepsilon_z = \chi(\sigma_z - \sigma_m) + \chi^* \sigma_m; \quad \gamma_{zx} = 2\chi\tau_{zx};$$

$$\chi = \frac{\gamma_i}{2\tau_i} = \frac{f(\tau_i, \sigma_m, \mu_0, t)}{2\tau_i}; \quad \chi^* = \frac{\varepsilon_m}{\sigma_m} = \frac{f^*(\sigma_m, \tau_m, \mu_0, t)}{\sigma_m}; \quad \text{при } \left. \begin{array}{l} \chi = \frac{1}{2G} \\ \chi^* = \frac{1}{K} \end{array} \right\} \text{Г}$$

а)



б)



Уравнения равновесия

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0;$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} = 0;$$

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} = 0;$$

Уравнения неразрывности деформаций

$$\frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2}, \quad \frac{2\partial^2 \varepsilon_x}{\partial x \partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(-\frac{\partial \gamma_{zy}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} \right);$$

$$\frac{\partial^2 \gamma_{yz}}{\partial y \partial z} = \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial y^2}, \quad \frac{2\partial^2 \varepsilon_y}{\partial y \partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(-\frac{\partial \gamma_{xz}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} + \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} \right);$$

$$\frac{\partial^2 \gamma_{zx}}{\partial z \partial x} = \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial z^2}, \quad \frac{2\partial^2 \varepsilon_z}{\partial z \partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(-\frac{\partial \gamma_{yx}}{\partial z} + \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} \right);$$

5

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, составляющих 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 переплотненные 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-

$$\sigma_{tot} = \sigma_s + \sigma_w \quad \text{— Терзаги 1923г}$$

нагало мг!



ловливают эффект уплотнения скелета и вызывают кулоновское трение между частицами. Напряжения, действующие в поровой воде, называют *порovým 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. Друкера, 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, кремень, 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.



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 электромолекулярными 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-





ется 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

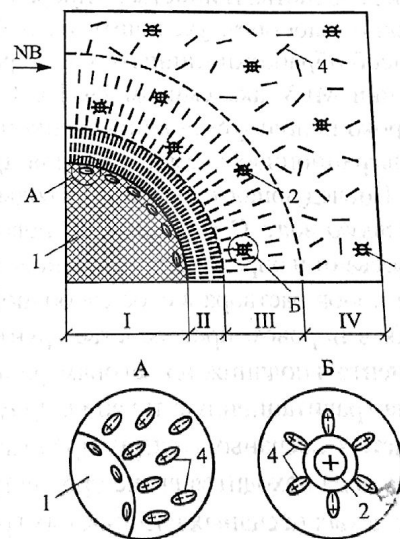


Рис. 1.1. Схема взаимодействия частиц с водой:

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 замерзания (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 противодиффузионных 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. $P_k = \gamma_w h_k$

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-

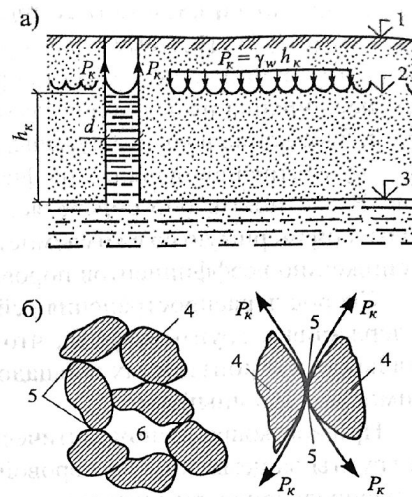


Рис. 1.2. Капиллярная вода в грунтах (а), взаимодействие капиллярной воды с минеральными частицами (б):

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 защемленный газ.

При кратковременном статическом и динамическом воздействиях на грунты защемленный 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 пылеватоглинистые (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 пылеватоглинистые 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).

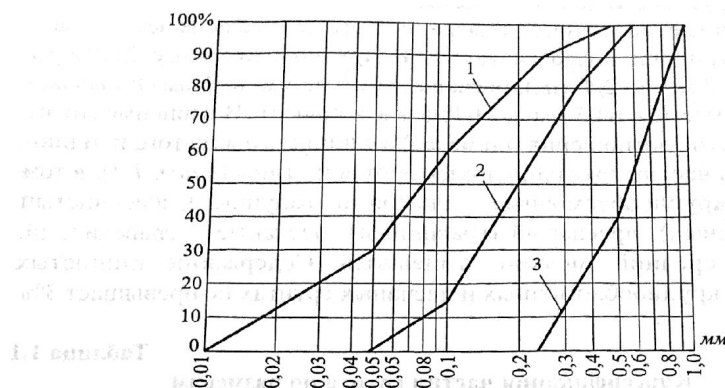


Рис. 1.3. Интегральная кривая зернового состава песка:
1 – пылеватого; 2 – мелкого; 3 – крупного

С ростом неоднородности наклон гранулометрической кривой становится меньше и наоборот. Для численной характеристики неоднородности крупнообломочных и песчаных грунтов используется показатель степени неоднородности

$$C_u = d_{60} / d_{10},$$

где d_{60} и d_{10} – диаметры частиц, меньше которых в данном грунте содержится соответственно 60% и 10% частиц.

Однородный грунт имеет показатель C_u , близкий к единице. При $C_u \geq 3$ грунт является неоднородным. Как было отмечено выше, неоднородность (гетерогенность) грунтов оказывает существенное влияние на их физико-механические свойства.

Текстура грунта определяет взаимное расположение частиц и их агрегатов в грунте, что связано с условиями образования грунта и определяет неоднородность сложения в грунтовой толще. Различают следующие основные виды текстуры грунтов в условиях естественного залегания: слоистая, ячеистая и слитная (рис. 1.4).

Особое значение имеет текстура глинистых грунтов, так как из-за плоских и продолговатых форм частиц могут образоваться особые ячеистые сильносжимаемые текстуры в виде «карточного домика» (рис. 1.4, а) или «книжного домика» (рис. 1.4, б). Если же агрегаты,



подобные пачкам листов, ориентированы параллельно и контактируют плоскими поверхностями, то образуется стопочная текстура, наиболее плотная и прочная текстура глинистого грунта (рис. 1.4, в).

История формирования пылевато-глинистых грунтов связана с многократным изменением нагрузки на них от вышележащих пород, в том числе от ледника. Так, например, в ледниковый период нагрузки на них достигали до 50 МПа. Поэтому природные грунты могут находиться в переуплотненном, нормально уплотненном и недоуплотненном состояниях. Переуплотненные грунты под влиянием существовавших ранее нагрузок подверглись значительному уплотнению; нормальноуплотненные грунты имеют плотность, примерно соответствующую действующей в настоящее время нагрузке; недоуплотненные грунты имеют плотность меньшую, чем плотность, соответствующая действующей в настоящее время нагрузке. Последние могут находиться в стадии незавершенной консолидации (уплотнения), таковыми являются, например, молодые отложения в водной среде (илы), или в стабильном состоянии за счет структурных связей (лессы).

Следует отметить, что состояние плотности грунтов в зависимости от истории нагружения (разгрузки) существенно влияет на напряженное состояние грунтовой толщи, особенно на напряжения в горизонтальном направлении. Мерой количественной оценки напряженного состояния грунтовой толщи является коэффициент бокового давления

$$\xi_0 = \frac{\sigma_x}{\sigma_z} = \frac{\sigma_y}{\sigma_z},$$

где σ_z – напряжение от собственного веса грунта в вертикальном (параллельно направлению силы гравитации) направлении; σ_x и σ_y – напряжения, перпендикулярные направлению действия σ_z .

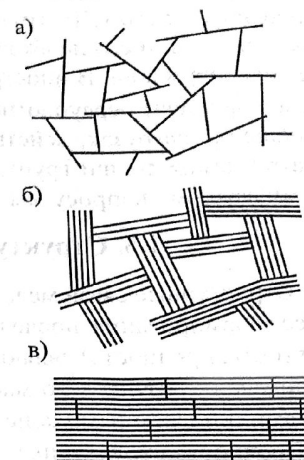


Рис. 1.4. Модели микротекстуры глинистых частиц (по В.И. Осипову)

В нормально уплотненных и недоуплотненных грунтах $\xi_0 \leq 1$, а в переуплотненных грунтах $\xi_0 \geq 1$.

Это обстоятельство существенно отражается на формировании дополнительного НДС грунтового массива под воздействием внешней нагрузки, и его необходимо учитывать при прогнозе НДС оснований сооружений. В иностранной литературе вместо ξ_0 используется коэффициент переуплотнения (OCR), который представляет собой отношение нагрузок, действовавших в истории формирования рассматриваемой толщи грунта и действующих в настоящее время. К этому важному вопросу мы вернемся позже еще раз.

Структурные связи в грунтах

Структурные связи между частицами в грунтах возникают в процессе формирования последних. Свойства этих связей (жесткость, упругость, прочность) являются важными факторами, определяющими поведение грунтового массива при его взаимодействии с фундаментами и подземными конструкциями сооружений.

Прочность структурных связей в сотни и до тысячи раз меньше прочности самих частиц, и поэтому прочность и деформируемость грунта в целом определяются характером этих связей. По характеру структурных связей грунты подразделяются на связные и несвязные (сыпучие). К связным относятся пылеватоглинистые грунты (глины, суглинки, супеси), к сыпучим – крупнообломочные и песчаные грунты. Связные грунты могут воспринимать растягивающие напряжения, сыпучие – нет. При частичном увлажнении в песчаных грунтах могут возникнуть небольшие силы сцепления за счет поверхностного натяжения водных пленок вокруг частиц. При полном насыщении пор водой эти силы исчезают.

Под действием внешней нагрузки в грунтовой среде возникают внутренние напряжения, которые воспринимаются скелетом грунта через контакты между частицами. Силы взаимодействия на контактах на начальном этапе приводят к деформации частиц и структурных связей. По мере роста нагрузки структурные связи разрушаются и начинается процесс взаимного смещения частиц с преодолением сил трения между ними – внутреннего трения. Эти силы трения зависят в основном от минералогического состава частиц, их формы и окатанности.

В песчаных грунтах, где, как правило, отсутствуют структурные связи, взаимное смещение частиц происходит практически при лю-





бых значениях нагрузок. Поэтому в несвязных грунтах отсутствует структурная прочность.

Структурные связи в глинистых грунтах имеют сложную природу и по времени возникновения разделяются на первичные и вторичные.

Первичные связи определяются электромолекулярными силами взаимного притяжения и отталкивания между частицами, а также между частицами и ионами в поровой воде и называются водно-коллоидными.

Вторичные связи возникают в результате старения коллоидов, их кристаллизации, а также процессов кристаллизации растворенных в воде солей и гелей оксидов кремния и железа, и называются кристаллизационными, или жесткими. Эти связи после их нарушения не восстанавливаются.

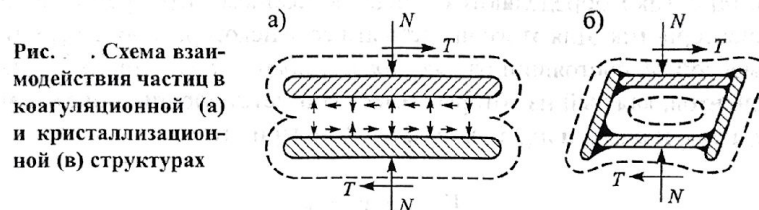
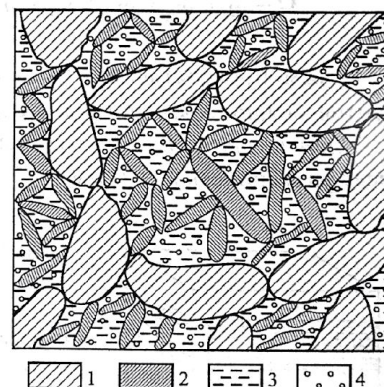


Рис. . Схема взаимодействия частиц в коагуляционной (а) и кристаллизационной (в) структурах

Рис. Структура глинистого грунта: 1 – крупные частицы, 2 – частицы глин и коллоидов, 3 – свободная вода с растворенным газом, 4 – пузырьки газа



Наконец, интерес для практики представляет природа связей между частицами в структурно-неустойчивых грунтах, которые от воздействия влаги и тепла теряют свои структурные связи. К ним относятся лессовые, просадочные, набухающие, вечномерзлые и рыхлые песчаные грунты. Особенности этих видов грунтов рассматриваются в последующих разделах настоящей книги (см. гл. 7).



В заключение отметим, что наличие в грунтах дефектов текстуры грунта и структурных связей приводит к возникновению концентрации напряжений и локального разрушения текстуры с дальнейшим его распространением в соседние участки, что в конечном итоге приводит к образованию поверхностей скольжения и разрушения грунта в целом. Более подробно связь между структурными связями и механическими свойствами грунтов также будет рассмотрена в следующих главах настоящей книги.

Характеристики физического состояния грунтов

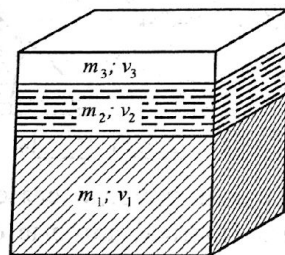
Физическое состояние грунтов определяется в основном тремя характеристиками: плотностью грунта в целом ρ , плотностью материала минеральных частиц ρ_s и влажностью грунта w . Остальные характеристики определяются с использованием этих трех основных характеристик. Для этого представим себе некоторый объем грунта V с массой M , состоящий из *твердого, жидкого и газообразного* компонентов, каждый из которых имеет соответствующий объем и массу, т.е. v_s и m_s , v_w и m_w , v_g и m_g (рис. 1.7). При этом

$$V = v_s + v_w + v_g,$$

$$M = m_s + m_w + m_g \approx m_s + m_w \text{ так как } m_g \ll m_s + m_w.$$

Объем пор составляет $v_w + v_g$. Теперь физическое состояние грунтов можно характеризовать следующим образом.

Плотность грунта – отношение массы грунта к его объему – имеет размерность г/см³, т/м³



1.7. Составные части компонентов грунта в объеме

$$\rho = M/V = (m_s + m_w)/(v_s + v_w + v_g) \quad (1.1)$$

и меняется в пределах 1,5–2,4 г/см³.

Она определяется способом режущего кольца с известным объемом или парафинированием образца произвольной формы. Объем грунта во втором случае определяется по объему вытесненного им объема воды. С помощью взвешивания определяют массу грунта без



учета массы кольца и парафина. Деля массу грунта на объем грунта, получают плотность грунта в целом. Плотность грунта играет важную роль при определении скорости распространения волн. Связь между скоростью распространения звуковых и упругих волн и плотностью грунта используется в геофизических методах для косвенного определения плотности грунта.

При определении напряжений от собственного веса грунта используют характеристику удельного веса грунта (кН/м³)

$$\gamma = \rho g, \quad (1.2)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение силы тяжести на Земле. Удельный вес грунтов колеблется в пределах от 13 до 23 кН/м³.

Плотность частиц грунта – отношение массы твердых частиц к их объему

$$\rho_s = m_s / v_s \quad (1.3)$$

и зависит только от минералогического состава.

Для грунтов она меняется в пределах от 2,4 до 3,2 г/см³, в том числе для песков – от 2,65 до 2,68 г/см³, для супесей – от 2,68 до 2,72 г/см³, для суглинков – от 2,68 до 2,75 г/см³, а для глин – от 2,71 до 2,76 г/см³. Плотность частиц определяют специальным пикнометрическим способом.

Удельный вес частиц можно получить аналогично (1.2), т.е.

$$\gamma_s = \rho_s g.$$

Влажность грунта – отношение массы воды к массе твердых частиц, выражается в долях единицы или в процентах

$$w = m_w / m_s = (M - m_s) / m_s \quad (1.4)$$

и определяется с помощью взвешивания массы грунта M до и после высушивания в термостате при температуре 105 °С до достижения стабильной массы m_s (масса сухого грунта).

Влажность грунтов меняется в пределах от 0,01 до 0,04 (пески, глины, супеси) и от 0,04 до 1 и более (илы, торфы).



На основе трех основных характеристик, определяемых экспериментальным путем, рассчитываются дополнительные характеристики физического состояния грунтов.

Плотность сухого грунта ρ_d или плотность скелета грунта определяют как отношение массы частиц грунта ко всему объему грунта:

$$\rho_d = m_s / V. \quad (1.5)$$

Сравнивая (1.3), (1.5) и (1.1), можно записать

$$\rho_d = \rho / (1 + w). \quad (1.6)$$

Удельный вес сухого грунта (скелета грунта) можно определить аналогично (1.2), т.е. по формуле

$$\gamma_d = \rho_d g = \gamma / (1 + w). \quad (1.7)$$

Пористость грунта – отношение объема пор ко всему объему грунта или объем пор в единице объема грунта

$$n = (v_w + v_g) / V. \quad (1.8)$$

Объем твердых частиц в единице объема грунта определяется как отношение объема твердых частиц ко всему объему грунта, т.е.

$$m = v_s / V,$$

следовательно,

$$m + n = 1. \quad (1.9)$$

Пористость грунта $n < 1$ и для обычных грунтов меняется в пределах от 0,3 до 0,5, а для лессовых и илистых – значительно больше.

Из соотношений (1.3) и (1.6) следует, что $m = \rho_d / \rho_s$, а с учетом (1.9) имеем

$$n = 1 - \rho_d / \rho_s. \quad (1.10)$$

Коэффициент пористости грунта обозначается через e и равен отношению объема пор к объему твердых частиц, т.е.

$$e = n / m = n / (1 - n), \quad m + n = 1$$

откуда следует, что

$$e = \rho_s (1 + w) / \rho - 1. \quad (1.11)$$

Из определения коэффициента пористости с учетом (1.9) следует, что

$$n = e / (1 + e); \quad m = 1 / (1 + e). \quad (1.12)$$

Коэффициент пористости является важнейшей характеристикой грунта и меняется в широких пределах. Он может быть больше единицы для слабых глинистых грунтов. Для песчаных грунтов он используется для характеристики состояния плотности в условиях естественного залегания, т.е. как классификационный показатель.

Важной характеристикой грунта является также степень насыщения пор водой, которая определяется как отношение влажности грунта в естественном состоянии к влажности при полном насыщении пор водой, т.е.

$$J_w = w / w_s,$$

где w_s – влажность грунта при полном насыщении пор водой.

При полном насыщении пор водой влажность равна отношению массы воды в порах к массе твердых частиц, т.е.

$$w_s = n \rho_w / m \rho_s = e \rho_w / \rho_s.$$

Тогда для степени водонасыщения получим выражение вида

$$J_w = \frac{w}{w_s} = \frac{w \rho_s}{e \rho_w}. \quad S_z = J_w \quad (1.13)$$

Из выражения (1.13) следует, что при полном насыщении пор водой коэффициент пористости определяется формулой



$$e = w \rho_s / \rho_w. \quad (1.14)$$

Коэффициент водонасыщения грунтов $J_w \leq 1$ и существенно влияет на механические свойства глинистых грунтов при действии кратковременной статической и динамической нагрузок. Это связано со сжимаемостью поровой газосодержащей воды. Известно, что в поровой воде всегда содержится то или иное количество воздуха в виде пузырьков или в растворенном состоянии, что существенно увеличивает объемную сжимаемость воды и делает её сравнимой с объемной сжимаемостью скелета грунта. Это приводит к существенным изменениям распределения тотальных напряжений между скелетом и поровой водой. Поэтому точность определения коэффициента водонасыщения глинистых грунтов имеет важное практическое значение. Следует отметить, что в плотных глинах содержится большое количество твердосвязанной воды с плотностью, больше 1 г/см^3 . Следовательно, если учитывать это обстоятельство в (1.13), в плотных глинистых грунтах истинное значение коэффициента водонасыщения будет меньше, чем при $\rho_w = 1 \text{ г/см}^3$.

Несвязные грунты подразделяются на следующие виды: *маловлажные* – при $J_w \leq 0,5$; *влажные* – при $0,5 \leq J_w \leq 0,8$ и *насыщенные водой* – при $J_w > 0,8$.

Ниже уровня грунтовых вод, при содержании в порах грунта гидравлически свободной и непрерывной воды, частицы грунта испытывают взвешивающее действие воды. Учитывая, что в единице объема грунта масса твердых частиц равна $(\rho_s - \rho_w)$, а их объем равен $m = 1 / (1 + e)$, получим, что масса скелета грунта во взвешенном в воде состоянии будет равна

$$\rho'_d = (\rho_s - \rho_w) / (1 + e) = (\rho_s - \rho_w) (1 - n). \quad (1.15)$$

Если перейти от плотности скелета к удельному весу, то получим

$$\gamma'_d = (\gamma_s - \gamma_w) (1 - n). \quad (1.16)$$

Эта важная характеристика необходима для определения напряжений в скелете грунта под действием собственного веса при его расположении ниже уровня грунтовых вод.

Однако взвешивающее действие воды в грунтах проявляется только в грунтах, поры которых содержат гидравлически непрерывную и свободную воду. В неполностью водонасыщенных грунтах



взвешивающее действие практически отсутствует и, следовательно, их удельный вес согласно (1.11) можно определить по формуле

$$\gamma = \gamma_s (1 + w) (1 - n). \quad (1.16, a)$$

В плотных глинах взвешивающее действие воды проявляется сложным образом и в настоящее время не учитывается. Считается, что, если коэффициент фильтрации грунта меньше 10^{-9} см/с, он является водоупорным, и взвешивающее действие поровой воды на частицы грунта отсутствует.

При водопонижении или подтоплении территории при определении напряжений от собственного веса грунта следует учитывать приращение удельного веса грунта. С учетом (1.16) и (1.16, а) оно равно

$$\Delta\gamma = (\gamma_s w + \gamma_w) (1 - n). \quad (1.16, б)$$

Характеристики физического состояния мерзлых грунтов

В отличие от обычных талых грунтов мерзлые грунты характеризуются тем, что в их порах всегда содержится то или иное количество цементирующего льда.

Относительной льдистостью грунта называется отношение массы льда m_i к массе всей воды m_w , содержащейся в грунте, т.е.

$$i = \frac{m_i}{m_w}. \quad (1.17)$$

Если известны содержание незамерзшей воды w_{ni} (в долях от сухого грунта) и влажность грунта w , то

$$i = 1 - \frac{w_{ni}}{w}. \quad (1.18)$$

Льдистость мерзлых грунтов можно определить с достаточной точностью калориметрическим путем, исходя из того, что лед будет выделять при оттаивании скрытую теплоту льдообразования.

Для мерзлых грунтов более удобно определить общую влажность – отношение массы воды к массе всего грунта, т.е.



$$w_{tot} = \frac{w}{1 + w} \quad (1.19)$$

Тогда масса скелета грунта m_d , масса льда m_i , масса жидкой фазы m_w и общая влажность w_{tot} будут связаны зависимостями вида

$$m_d = (1 - w_{tot}) \cdot m, \quad (1.20)$$

$$m_i = w_{tot} i, \quad (1.21)$$

$$m_w = w_{tot}(1 - i). \quad (1.22)$$

Классификационные показатели грунтов

Классификационные показатели грунтов применяются для отнесения грунтов к той или иной категории, необходимой для выделения инженерно-геологических элементов (ИГЭ) в грунтовой толще и для предварительной оценки состояния грунтового массива как основания или среды подземной части проектируемого сооружения.

К классификационным показателям относятся *состав* (зерновой и минералогический, влажность и степень влажности) и характеристики физического состояния грунтов (плотность для песчаных грунтов и консистенция для глинистых грунтов). Зерновой состав песчаных грунтов позволяет отнести их к пескам различной крупности или к крупнообломочным грунтам (см. *табл. 1.1*).

Для глинистых грунтов первостепенное значение имеет количественное содержание мелких и мельчайших частиц (плоскочешуйчатых и тонкоигольчатых мономинеральных частиц размерами менее 5 мкм), которое определяет диапазон влажности, в котором грунт будет находиться в пластичном состоянии. Этот диапазон характеризуется *числом пластичности* I_p и равен разности между двумя влажностями, характерными для глинистых грунтов: *границей текучести* W_L и *границей пластичности* W_p , т.е.

$$I_p = W_L - W_p. \quad (1.23)$$

При влажности, соответствующей W_L , грунт переходит в *текущее состояние*, а при влажности, соответствующей W_p , он теряет свою пластичность. Первую из них определяют с помощью стандарт-



ного конуса массой 76 г с углом при вершине 30° и меткой на уровне 10 мм. Если этот конус погружается в грунтовую пасту до метки, то грунт имеет влажность, соответствующую W_L . Если же конус погружается больше или меньше этой отметки, то в пасту добавляют сухой порошок или воду до тех пор, пока не получают соответствующую консистенцию. Вторую из них определяют путем раскатывания на бумаге пасты грунта до потери им пластичности, т.е. когда жгут диаметром 2–3 мм, подсыхая во время раскатывания, начинает крошиться. В таком состоянии грунт имеет влажность, соответствующую влажности W_p .

Эти границы, предложенные профессором Аттербергом, несмотря на их условность, рекомендуются строительными нормами для определения наименования глинистых грунтов.

При $I_p > 17$ грунт представляет собой глину; при $7 < I_p < 17$ – суглинок, при $I_p < 7$ – супесь.

В сопоставлении с их естественной влажностью эти границы с достаточной степенью точности характеризуют физическое состояние грунтов и рекомендуются строительными нормами для определения их консистенции, т.е. величины

$$I_L = \frac{W - W_p}{W_L - W_p}. \quad (1.24)$$

Различают следующие консистенции глин в зависимости от индекса текучести I_L : твердая – $I_L < 0$, полутвердая – $I_L = 0,25$, тугопластичная – $I_L = 0,25-0,5$; мягкопластичная – $I_L = 0,5-0,75$; текучепластичная – $I_L = 0,75-1$; текучая – $I_L \geq 1$. Консистенцию глинистых грунтов можно определить также по результатам статического зондирования.

Для глинистых грунтов показатели консистенции позволяют установить применимость той или иной теории для описания НДС массива глинистого грунта, в том числе теории однокомпонентных или двухкомпонентных сред.

Плотность песчаных грунтов не может быть оценена визуально и поэтому определяется специальными лабораторными и полевыми (зондирование) испытаниями.

Лабораторными испытаниями определяют коэффициент пористости песчаного грунта и в зависимости от гранулометрического состава относят их к той или иной плотности (табл. 1.2).



Таблица 1.2

Разделение песков по коэффициенту пористости e

Тип песка	Плотность сложения		
	плотные	средней плотности	рыхлые
Пески гравелистые, крупные и средней крупности	$e < 0,55$	$0,55 \leq e \leq 0,7$	$e > 0,7$
Пески мелкие	$e < 0,6$	$0,6 \leq e \leq 0,75$	$e > 0,75$
Пески пылеватые	$e < 0,6$	$0,6 \leq e \leq 0,8$	$e > 0,8$

Более общей характеристикой плотности песчаных грунтов является показатель плотности I_d , определяемый по формуле

$$I_d = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}, \quad (1.25)$$

где e_{\max} и e_{\min} – коэффициенты пористости песка в максимально рыхлом и максимально плотном состояниях соответственно, e – коэффициент пористости грунта в естественном состоянии, при этом e_{\max} достигается медленным насыпанием сухого песка в мерный сосуд, а e_{\min} – путем вибрации и постукивания того же сосуда с песком.

При $I_d \leq 1/3$ – песок рыхлый, $I_d = 1/3 - 2/3$ – песок средней плотности, $I_d \geq 2/3$ – песок плотный.

В зависимости от состава, плотности и степени водонасыщения песка строительными нормами рекомендуются величины расчетных нагрузок на песчаное основание.

Определение характеристик плотности песчаного грунта, особенно залегающего ниже уровня грунтовых вод, связано с большими трудностями. Поэтому для получения показателей относительной плотности используется метод *статического* или *динамического* зондирования.

Классификационные показатели грунтов позволяют не только отнести их к той или иной категории, но также и оценить их способность нести нагрузку, передаваемую через фундаменты сооружения. Ведь классификационные показатели достаточно информированы относительно физического состояния грунтов (плотность, влажность, зерновой состав, консистенция и т.п.) и, следовательно, характеризуют грунт как сплошную деформируемую среду, способную сопротивляться внешним нагрузкам. Поэтому установление связи между классификационными показателями и механическими свойствами грунтов в определенных условиях правомочно.



Основываясь на обобщении большого количества испытаний, строительные нормы допускают для предварительных расчетов оснований сооружений II и III классов и опор линий электропередачи определять нормативные и расчетные характеристики прочности и деформируемости по их физическим характеристикам. Кроме того, строительные нормы рекомендуют определять несущую способность оснований в зависимости от их классификационных показателей.



1.8. Структурно-неустойчивые грунты

К структурно-неустойчивым грунтам относится ряд региональных видов грунтов, в том числе: вечномерзлые, просадочные лессовые, набухающие, водонасыщенные, рыхлые, песчаные, слабые водонасыщенные глинистые и др. Отличительная особенность этих видов грунтов заключается в том, что структурные связи в них нарушаются при одновременном силовом и физическом воздействиях. К физическим воздействиям относятся температурные (для вечномерзлых грунтов), увлажнение (для лессовых просадочных и набухающих глинистых грунтов), вибрация и динамика (рыхлые пески) и др.

В условиях естественного залегания многие виды структурно-неустойчивых грунтов могут нести значительные нагрузки (лессы, набухающие, мерзлые грунты). Однако при потере структурных связей они существенно снижают свою прочность, и происходят большие просадки (набухания) не только под действием внешней нагрузки, но также под действием собственного веса.

Для установления влияния структурности данного вида грунта на механические свойства необходимо определить эти свойства как при ненарушенной структуре грунта, так и после нарушения структуры.

Количественным выражением структурности грунтов может служить индекс чувствительности грунтов I_f , равный отношению прочности грунта в ненарушенном состоянии R к его прочности в нарушенном состоянии R' , т.е.

$$I_f = \frac{R}{R'}. \quad (1.26)$$

Значение I_f для большинства глин находится в пределах от 2 до 4, а для чрезмерно чувствительных глин (ленточных) доходит до 8.

Подробно к механическим свойствам структурно-неустойчивых грунтов мы вернемся в гл. 7 настоящей книги.