

6

Динамические свойства мерзлых грунтов

Динамические свойства мерзлых грунтов зависят, во-первых, от факторов, определяемых внешней нагрузкой: продолжительностью, частотой и амплитудой, скоростью и температурой. И во-вторых, от состава мерзлого грунта: льдистости, наличия незамерзшей воды, анизотропии.

Как правило, цель исследований мерзлых грунтов заключается в оценке их прочностных и деформационных свойств при динамическом нагружении. Деформирование мерзлых грунтов динамической нагрузкой приводит к возникновению мгновенной деформации и деформации ползучести. Мгновенная деформация описывается некоторыми динамическими параметрами, такие как динамический модуль упругости, динамический коэффициент Пуассона и коэффициент демпфирования.

Подобно действию статической нагрузки, динамическая деформация ползучести обусловлена такими факторами, как время разрушения, деформация, соответствующая моменту разрушения, минимальная скорость ползучести и другие, отражающие динамические свойства мерзлых грунтов.

На динамическое поведение мерзлых грунтов оказывают влияние также внутренние факторы, подобные влажности, плотности грунта в сухом состоянии и внешние факторы, такие как температура, всестороннее давление, амплитуда напряжений, частота нагружения и другие. Основные динамические свойства мерзлых грунтов рассмотрены ниже.

Исследования динамических свойств мерзлых грунтов начались примерно с 60-х годов прошлого столетия (Цветкова, 1960; Прокудин, 1970, 1973; Надеждин и Сорокин, 1975; Youssef et al., 1982; Togrol et al., 1982; Trimble & Mitchell, 1982; Shuguang & Xiangdong, 2006; Liu, L., et al., 2016; Ding et al., 2019 и др.). Цель исследований заключается в оценке прочностных и деформационных свойств мерзлых грунтов при динамическом нагружении.

Характер динамической нагрузки определяется внешним воздействием на грунты. При исследовании динамических свойств грунтов в основании дорог

применяется циклический характер внешней нагрузки с заданной частотой и амплитудой. Согласно существующим результатам полевого мониторинга, динамическое давление на балласт – основание железнодорожного полотна – имеет форму, похожую на половину синусоиды. Таким образом, это моделирует однонаправленное импульсное нагружение грунта под воздействием нагрузки от поезда путем нагружения односторонней синусоидальной волной, как показано на рис. 6.1. Это объясняется тем, что в момент циклического нагружения поровая вода в грунте не успевает отжаться, т.е. не может быть дренирована.

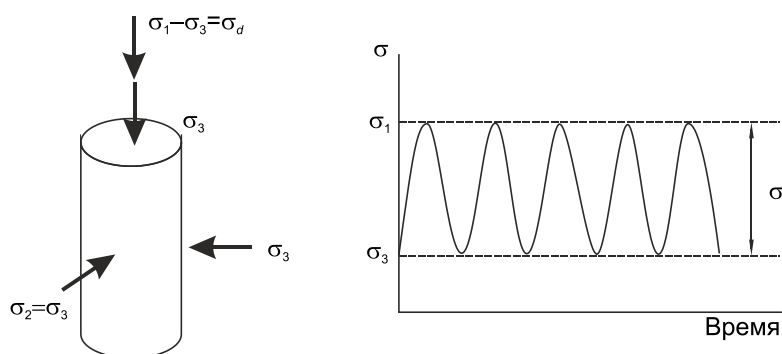


Рис. 6.1. Схема динамического нагружения нагрузкой от движущегося транспорта

Для ряда специфических задач требуется оценка поведения мерзлого грунта при ударной нагрузке с большой скоростью деформации до 1000/с (Zhang, D., et al., 2016). На рис. 6.2 показана форма разрушения образца мерзлой глины при высокой скорости деформации.

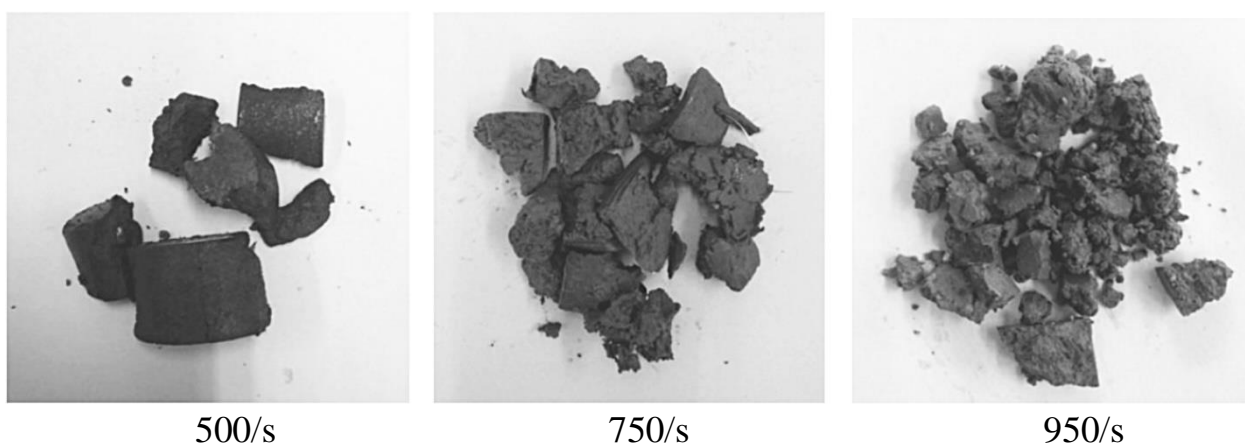


Рис. 6.2. Характер разрушения образца ударной нагрузкой при различной скорости деформации (Zhang, D., et al., 2016)

Большинство динамических параметров мерзлых грунтов определяется из испытаний в условиях трехосного сжатия. Прокудин И.В. и Жинкин Г.Н. (1973) провели испытания грунтов моделируя их динамическое поведение в основании железнодорожной насыпи и показали зависимость прочности от циклического нагружения. Vinson & Li (1980) провели динамические испытания в условиях трехосного сжатия мерзлого грунта при различном всестороннем давлении и температуре. Jessberger & Jordan (1982), Trimble & Mitchell (1982) исследовали влияние температуры и частоты на упругое и пластическое деформирование при циклическом трехосном нагружении. Shen, Z. & Zhang (1997) провели испытания при постоянной амплитуде скорости деформации и нашли зависимость между динамической прочностью и статическим эффективным нормальным напряжением. Xu, X. et al. (1998), используя криогенную установку MTS-810 исследовали зависимости между напряжениями и деформациями мерзлого грунта, динамические упругие модули и динамический коэффициент Пуассона при изменении отрицательной температуры. Wu, Z. Et al. (2004) исследовали поведение динамического определяющего уравнения перемятого мерзлого лесса и нашли зависимость динамических упругих модулей при температуре в диапазоне от -2 до -10°C . Zhao, S. Et al. (2003), Wang et al. (2008) провели трехосные динамические испытания при динамическом нагружении с постоянной амплитудой и нашли, что динамические упругие модули возрастают с ростом частоты или уменьшения температуры, в то время как коэффициент демпфирования показывает противоположную тенденцию.

6.1. Динамические методы испытаний

Наиболее часто используемыми методами динамических испытаний грунтов в лабораторных условиях являются испытания в резонансной колонке, трехосные циклические испытания, циклические испытания в условиях одноплоскостного среза и испытания с измерением скорости поперечных волн.

Наиболее важными различиями между различными динамическими лабораторными испытаниями являются уровни напряжений и деформации, которые достигаются в грунте, как это видно на рис. 6.1-1. Поскольку грунты обычно деформируются нелинейно, желательно воспроизвести фактические уровни напряжений, возникающие в основании сооружений при динамическом нагружении. Таким образом, напряжения в основании сооружений являются показателем того, какой тип испытаний следует использовать.



Рис. 6.1-1. Диапазон деформаций в динамических испытаниях

6.1.1. Испытания в резонансной колонке

Данный метод испытаний регламентирован ГОСТ 56353-2015 для немерзлых дисперсных грунтов, но сам принцип измерений применим и для мерзлых грунтов.

Суть испытаний заключается в нагружении цилиндрического образца грунта торсионным колебательным движением с изменяемой частотой колебаний вплоть до резонансной частоты. В результате определяют упругий модуль сдвига и коэффициент демпфирования как функция всестороннего давления и амплитуды деформации сдвига.

На рис. 6.1-2 показан общий вид прибора для резонансных испытаний и его основные элементы.

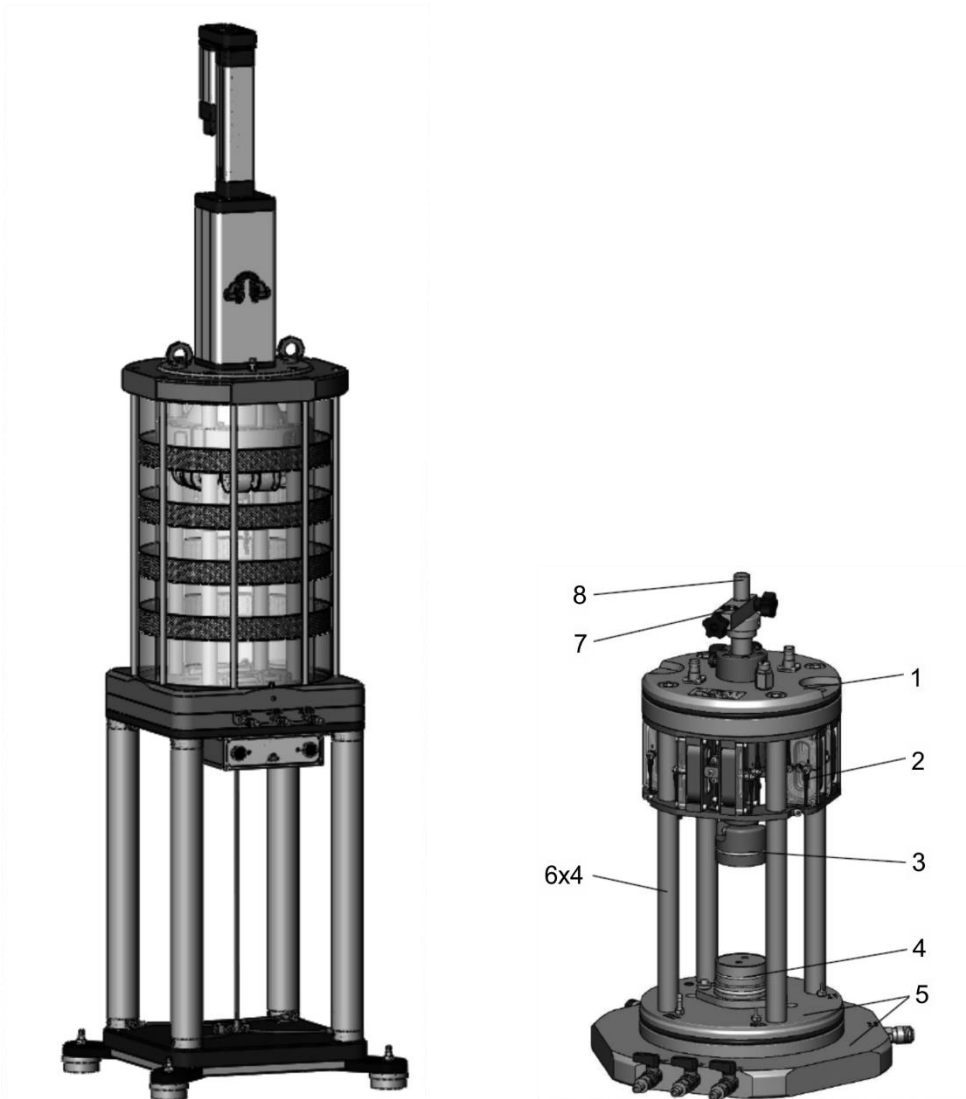


Рис. 6.1-2. Схема устройства динамического нагружения: 1 – крышка; 2 – электромагнитный привод; 3 – верхний штамп; 4 – нижний штамп; 5 – основание; 6 – шпильки; 7 – держатель; 8 – шток (ООО «НПП Геотек»)

Процедура испытаний

Испытания проводятся следующим образом.

1. Подготовленный образец грунта в резиновой оболочке размещается на опорной плите камеры давления.

2. Устанавливается верхняя крышка с электромагнитным приводом и подается давление воздуха в камеру давления.

3. Через некоторое время применяется динамическое возбуждение с определенным напряжением и частотой.

4. Частота меняется автоматически.

5. Частота максимальной выходной амплитуды принимается за резонансную частоту или собственную частоту.

6. После выключения системы возбуждения образец грунта показывает свободную затухающую вибрацию, которая регистрируется.

7. Подобная процедура применяется для других амплитуд возбуждения.

8. Испытания повторяются для разных давлений в камере.

Результаты испытаний

Демпфирование может быть определено либо из функции частотного поведения путем оценки ширины полосы резонансного пика, или от затухания свободных колебаний методом логарифмического декремента. Более подробную информацию можно найти в работе Г.Г. Болдырев, И.Х. Идрисов (2018) и А.А. Живаев (2019).

Оценка модуля сдвига требует дополнительных пояснений. Вибрационная система включает колонну грунта с дополнительной массой на верхнем торце. Поэтому должны быть известны момент инерции столба грунта и верхнего узла. Момент инерции верха определяется калибровочными испытаниями. Используя данные устройства резонансной колонки, измеренная собственная частота оценивается с использованием частотного уравнения неподвижного торсионного столба с верхней массой (импульсом массы). После этого находится модуль сдвига для каждого всестороннего давления в камере давления и каждого уровня деформации. Деформация сдвига рассчитывается через ускорение, положению акселерометра и размерам образца грунта.

Некоторые результаты испытаний резонансной колонны показаны на рис. 6.1-3 и 6.1-4. Результаты на рис. 6.1-3 ясно показывают деградацию модуля сдвига с увеличением деформации. Результаты на рис. 6.1-4 показывают увеличение коэффициента демпфирования с ростом деформации сдвига.

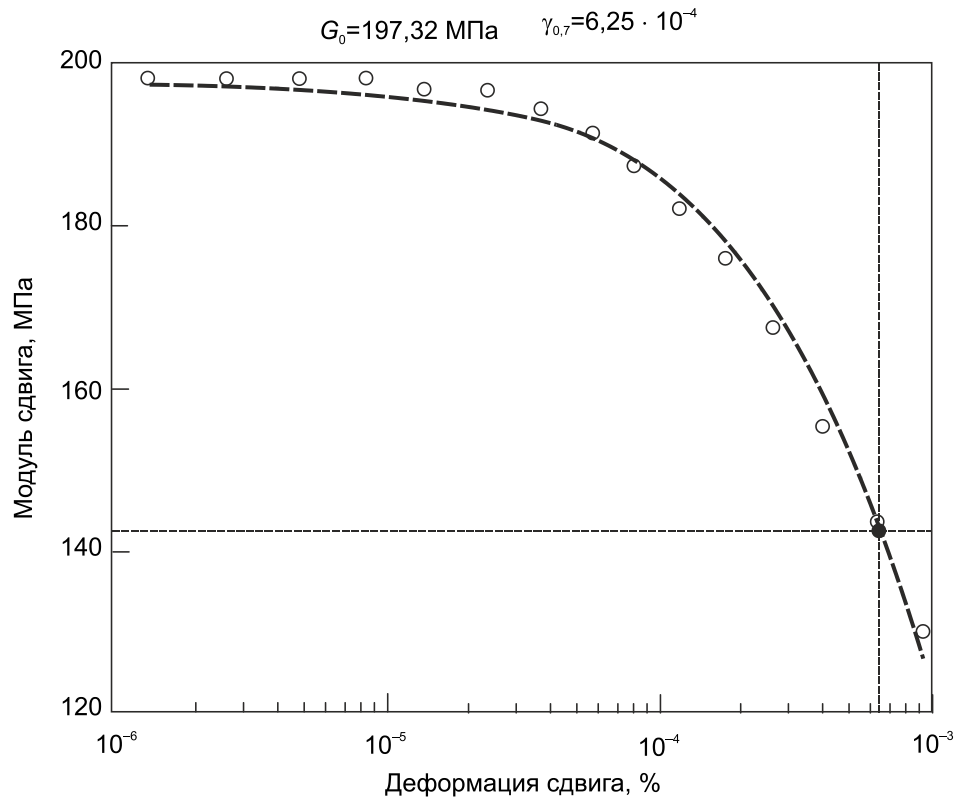


Рис. 6.1-3. Дegradация модуля в песчаном грунте

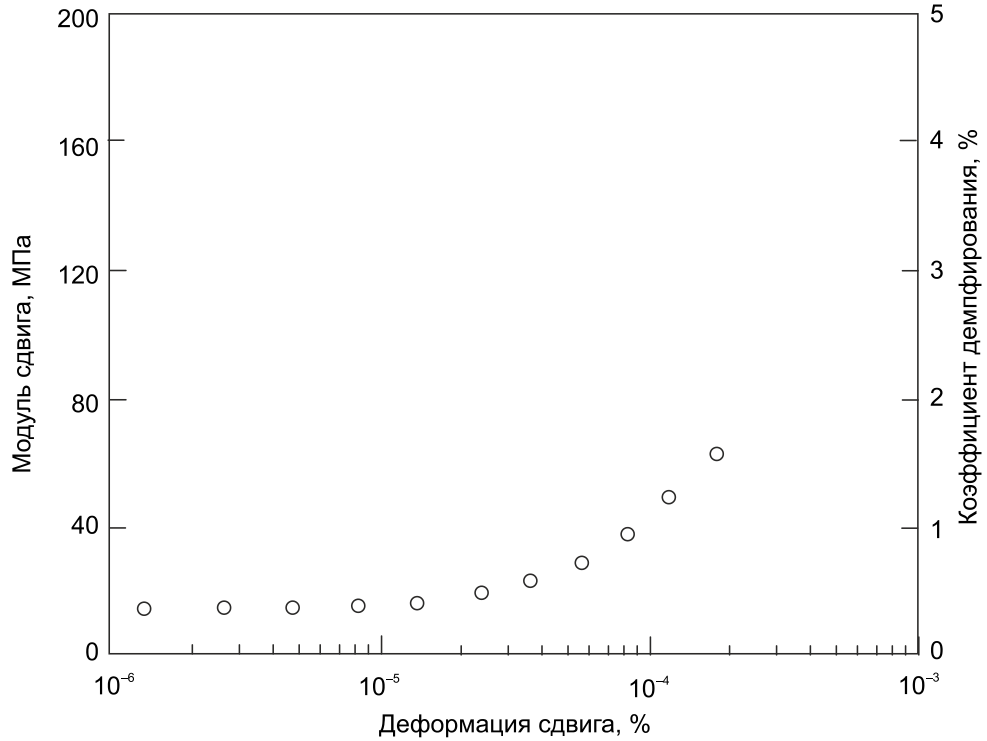


Рис. 6.1-4. Зависимость коэффициента демпфирования от деформации сдвига для песчаного грунта

6.1.2. Циклические испытания в условиях простого сдвига

Первый прибор простого сдвига (Direct Simple Shear – DSS) был разработан в 1960-х годах в Норвежском геотехническом институте. Он был сконструирован для моделирования деформаций сдвига, разделяющих две, по существу, жесткие массы, скользящие по отношению друг к другу. Это условие аппроксимирует поведение некоторых оползней, которые смещаются вдоль криволинейной поверхности скольжения. Испытания в условиях простого сдвига соответствуют нагрузке при землетрясении, как показано на рис. 6.1-5.

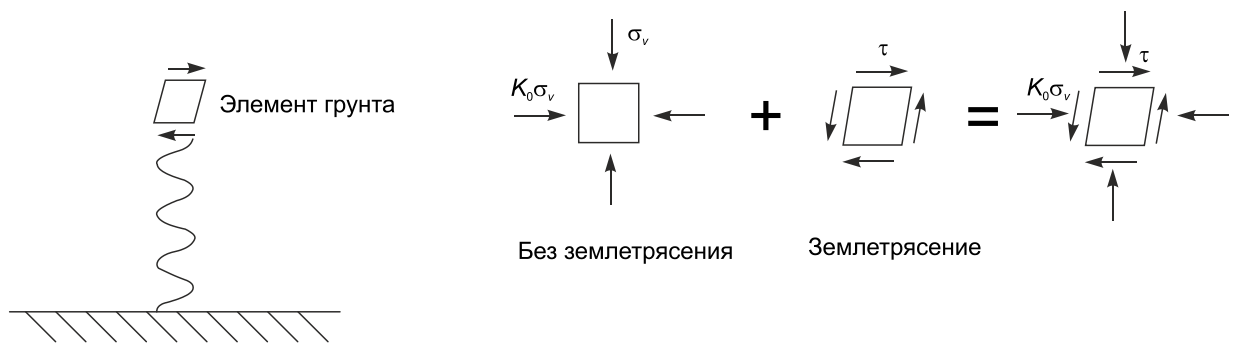


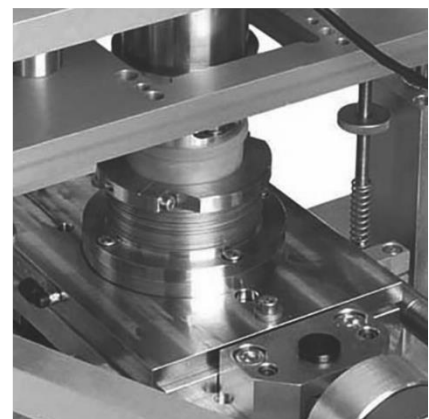
Рис. 6.1-5. Нагружение элемента грунта при землетрясении

Испытания проводятся с целью определения упругого модуля сдвига, коэффициента демпфирования и коэффициента циклических напряжений.

На рис. 6.1-6 показан прибор фирмы Wille Geotechnik для испытания на



а)



б)

Рис. 6.1-6. Общий вид прибора простого сдвига (а) и рабочая камера (б)

циклический сдвиг. Прибор простого сдвига создает анизотропное нормальное напряженное состояние под действием внешних сил и давления в камере на прямоугольный или цилиндрический образец. Горизонтальное движение в нижней части образца грунта относительно верхнего штампа вызывает деформацию сдвига. Набор стальных колец поддерживает образец в боковом направлении, следуя за движением грунта, обеспечивая тем самым горизонтальное отклонение во время сдвига, но избегая деформаций в боковом направлении при уплотнении. Деформация сдвига по объему образца считается почти однородной. Поскольку диаметр образца остается постоянным, любое изменение объема является результатом вертикального смещения верхнего штампа.

Результаты испытаний

На рис. 6.1-7 приведены результаты испытаний плотного песка при контролируемой деформации сдвига с амплитудой $\gamma = \pm 1,5\%$. Можно отметить дальнейшее уплотнение плотного песка и уменьшение касательного напряжения во времени. Нормальное напряжение сохранялось постоянным и равным 200 кПа в течение действия касательного напряжения.

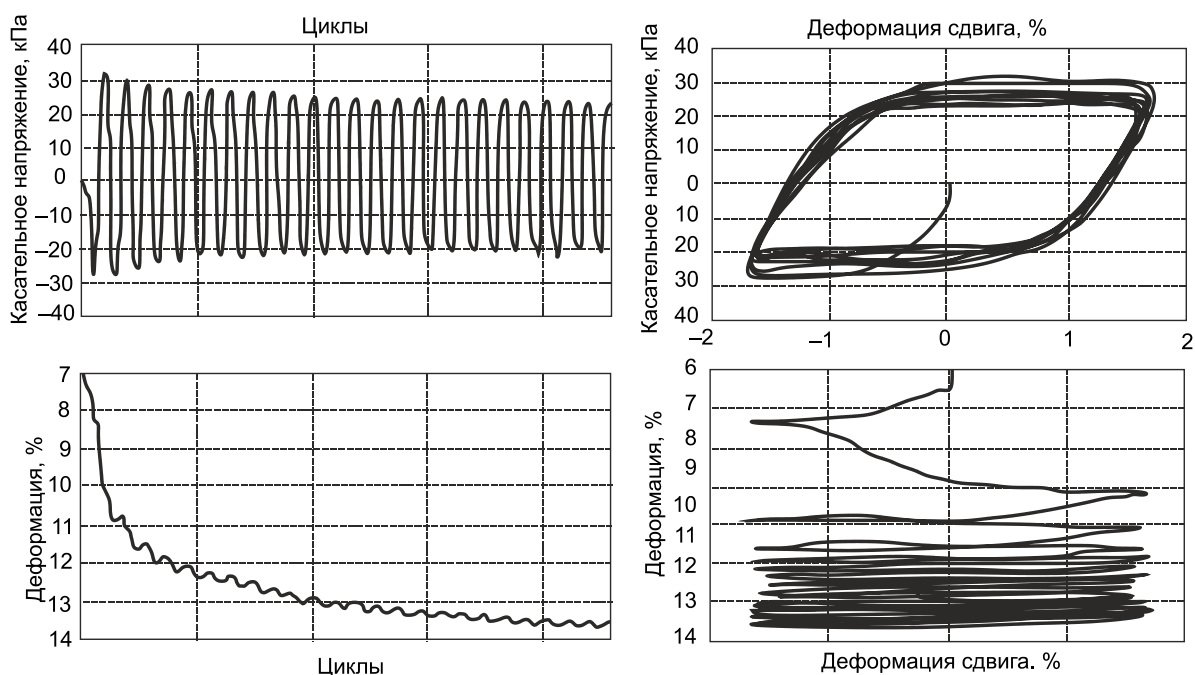


Рис. 6.1-7. Результаты испытаний с контролируемой деформацией плотного песка (Rivas, 2011)

Детальное описание данного метода испытаний, процедуру испытаний, интерпретацию данных испытаний можно найти в работе Г.Г. Болдырев, И.Х. Идрисов (2018).

6.1.3. Циклические трехосные испытания

Динамические трехосные испытания является одним из наиболее часто используемых лабораторных методов благодаря своей универсальности и простоте в моделировании различных траекторий напряжений. Данный метод рекомендован ГОСТ 56353-2015 для немерзлых дисперсных грунтов, но сам принцип измерений применим и для мерзлых грунтов.

Основное назначение динамических трехосных испытаний состоит в определении потенциала грунтов к разжижению, динамических модулей деформации и упругости, а также коэффициента демпфирования. В частности, определение модуля упругости, зависящего от деформации и коэффициента демпфирования при вибрационном воздействии от транспорта или других машин и механизмов, например, в машинном зале АЭС.

На рис. 6.1-8 показан прибор ООО «НПП Геотек» в двух модификациях для трехосных динамических испытаний.

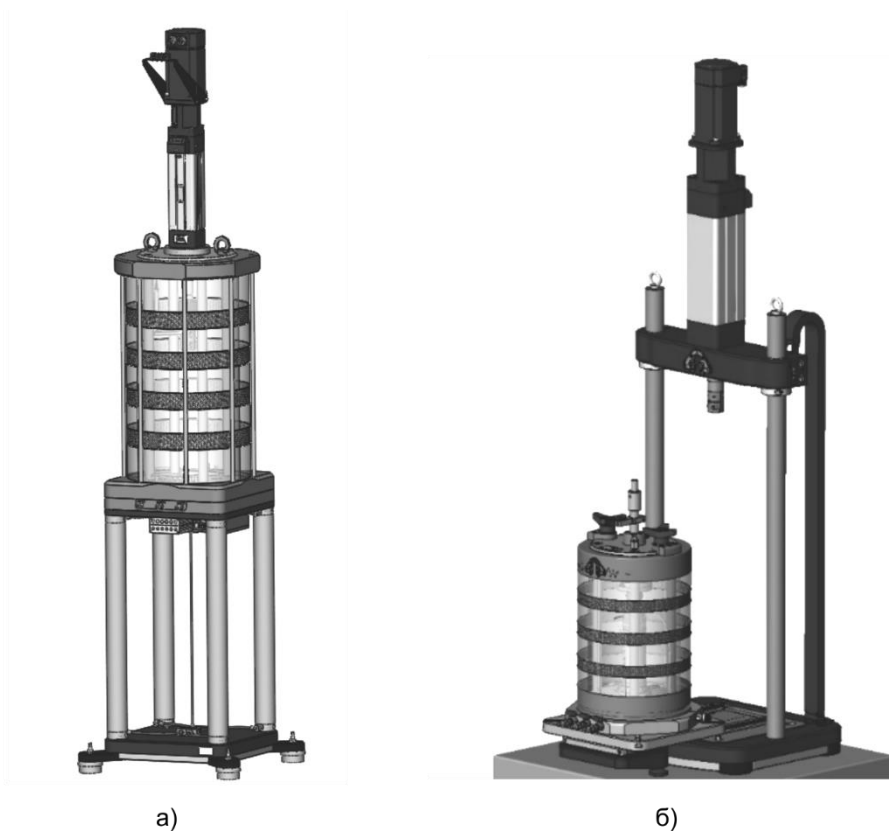


Рис. 6.1-8. Прибор трехосного сжатия динамический

Детальное описание данного метода испытаний, процедуру испытаний, интерпретацию данных испытаний можно найти в работе Г.Г. Болдырев, И.Х. Идрисов (2018).

6.1.4. Высокоскоростное динамическое нагружение

Подобные испытания проводятся при высоких скоростях нагружения и высоком давлении. К таким условиям относятся: анализ распространения сильных сейсмических и взрывных волн и их взаимодействия с надземными и подземными сооружениями, задачи использования энергии взрыва при строительстве плотин, каналов и т.п. Особое место в динамике грунтов отводится анализу процессов ударного взаимодействия твердых тел с грунтовыми средами и вопросам проникания (Semblat et al., 1999; Брагов и др., 2017).



Рис. 6.1-9. Фото установки Кольского для динамических высокоскоростных испытаний (Kabir et al., 2010)

Kabir & Chen (2009) разработали новую измерительную систему для измерения малых деформаций и перемещений в динамических ударных испытаниях с использованием балки (стержня) Гопкинса (Split Hopkinson Pressure Bar – SHPB). Принцип действия стержня Гопкинсона заключается в

определении динамических напряжений, деформаций или перемещений на конце стержня по данным, полученным на некотором расстоянии от него. Возмущение, возникшее на конце длинного упругого стержня, распространяется по нему без искажений (за исключением компонент очень высокой частоты) со скоростью упругой волны $c = \sqrt{E/\rho}$. Поэтому тензометрический датчик посередине стержня регистрирует усилие на конце стержня в функции времени, но с некоторой задержкой по времени (Брагин и др, 2018).

Впервые подобный тип испытаний был выполнен Kolsky Н. в 1949 году. В последствие данный метод испытаний стали называть, как метод Кольского. В этом методе испытаний измеряется не только осевое динамическое напряжение в образце в течение высокоскоростной стадии эксперимента, но и ряд других параметров. Датчик давления измеряет гидростатическое давление в рабочей камере прибора. Изменение динамического давления в камере в течение осевого ударного нагружения контролируется резисторным датчиком, размещенный внутри рабочей камеры. Kabir & Chen (2009) утверждают, что стандартные методы измерений могут адекватно записывать осевую нагрузку и деформации на образец грунта при статическом нагружении, но не адекватно измеряют быстро изменяющуюся нагрузку и деформацию образца в динамических испытаниях. Для решения данной задачи они применили балку Кольского (рис. 6.1-10) с длительностью действия динамической осевой

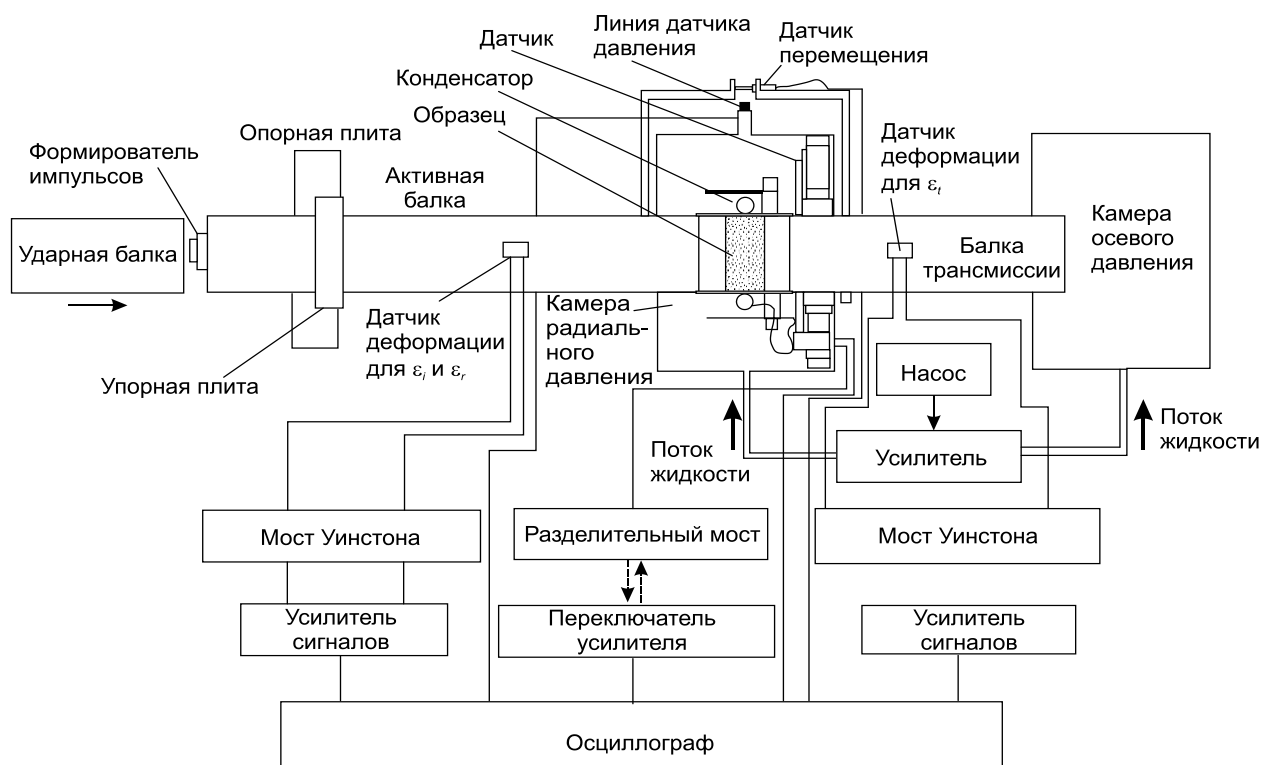


Рис. 6.1-10. Схема динамической трехосной измерительной системы с балкой Гопкинса (Kabir & Chen, 2009)

нагрузки сжатия в 200 мс. Тензометрические датчики деформации, примененные на балке Кольского и датчики давления были установлены внутри рабочей камеры давления, вокруг образца. Емкостной датчик был применен для измерения радиальных изменений образца.

На рис. 6.1-11 показана схема установки в исследованиях Квин-Юонг Ма (2010), в которой он провел испытания замороженной глины по методу Гоп-

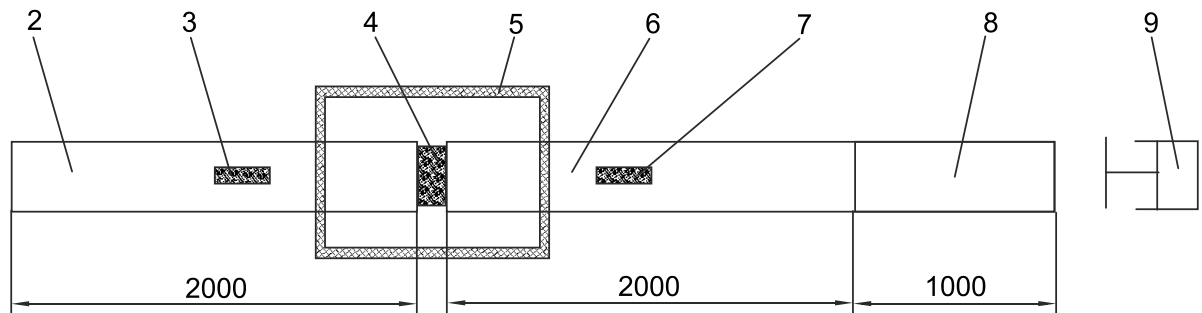


Рис. 6.1-11. Схема установки, используемой в опытах с замороженным грунтом: 1 – ударный стержень; 2 – подводящий стержень; 3 – датчики деформации; 4 – образец мерзлого грунта; 5 – низкотемпературная камера; 6 – отводящий стержень; 7 – полупроводниковые тензодатчики; 8 – отскакивающий стержень; 9 – буфер

кинса в низкотемпературной камере. Выполненные испытания при скорости деформирования в диапазоне от 360 до 1470 с⁻¹ и различной температуре

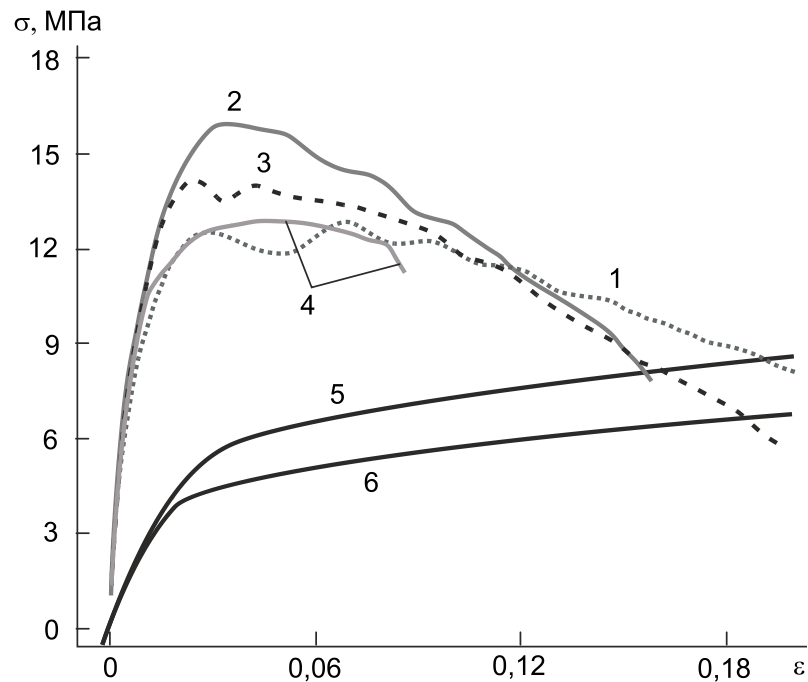


Рис. 6.1-12. Зависимость напряжений от деформации при температуре -17°C и различных скоростях деформирования: 1 – $\dot{\epsilon} = 1445 \text{ c}^{-1}$; 2 – $\dot{\epsilon} = 1028 \text{ c}^{-1}$; 3 – $\dot{\epsilon} = 622 \text{ c}^{-1}$; 4 – $\dot{\epsilon} = 284 \text{ c}^{-1}$; 5 – $\dot{\epsilon} = 0,01 \text{ c}^{-1}$; 6 – $\dot{\epsilon} = 0,001 \text{ c}^{-1}$

от -5 до -20°C показали их влияние на свойства мерзлого грунта. Температура и скорость деформации оказывают также существенное влияние на вид зависимости напряжение-деформация, чем ниже температура и выше скорость деформации, тем более явно проявляется эффект хрупкого разрушения в виде кривых деформации с упрочнением и разупрочнением (рис. 6.1-12).

Zhang, D. et al. (2016) провели подобные испытания образца грунта диаметром 30 мм и высотой 18 мм при температуре -5 , -15 , -25°C и трех скоростях деформации (500/с, 750/с и 950/с). Затем используя результаты испытаний и программу LS-Dyna и модель поведения материала Holmquist-Johnson-Cook (HJC) они выполнили численное решение, некоторые результаты которого показаны на рис. 6.1-13.

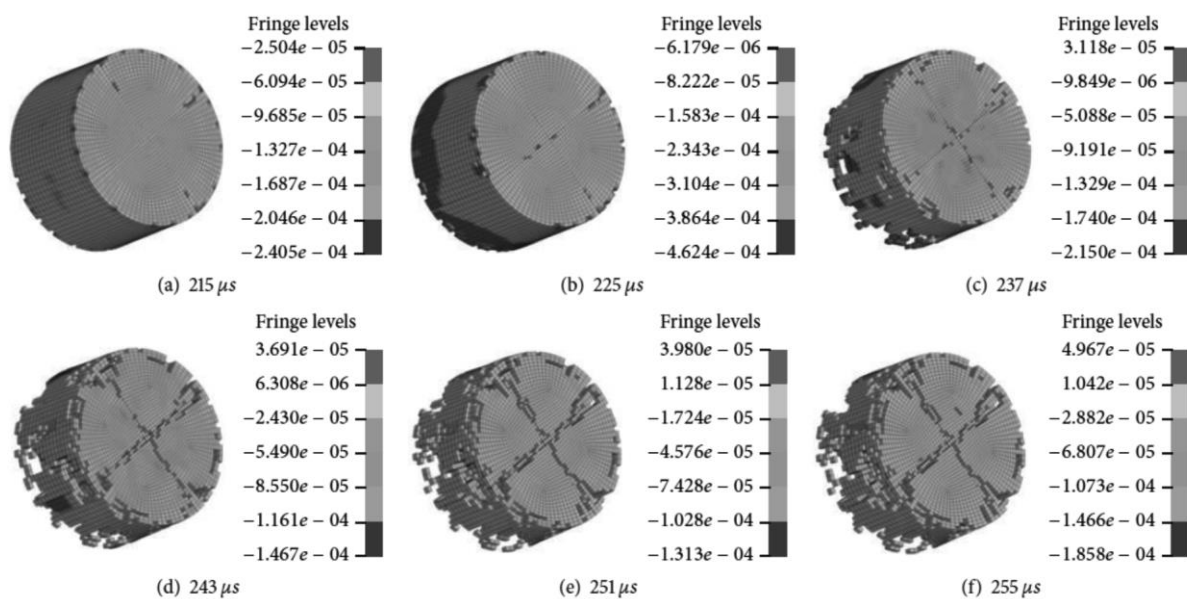


Рис. 6.1-13. Моде деформации образца мерзлого грунта при различной скорости деформации на стадии разрушения (Zhang, D. et al., 2016)

Выполненные исследования показали, что для данной температуры мерзлого грунта пиковое напряжение и конечная деформация увеличиваются с увеличением скорости деформации. Для заданной скорости деформации максимальное напряжение увеличивается с понижением температуры, а предельные деформации сближаются.

6.2. Прочностные свойства мерзлых грунтов при динамическом нагружении

Нагружение мерзлых грунтов динамической нагрузкой с одной и той же амплитудой приводит к накоплению деформаций вплоть до разрушения. При этом определяющим является время до разрушения, скорость деформации ползучести и предел прочности (Torgol et al., 1982; He, P. et al., 1993).

Цветкова С.Г. (1960) сравнила прочность мерзлого и немерзлого грунта при циклическом нагружении и нашла, что прочность уменьшилась на 22% для мерзлого образца при температуре от $-0,8$ до $-1,0^{\circ}\text{C}$.

Прокудин И.В. (1970), Прокудин И.В. и Жинкин Г.Н. (1973) провели динамические испытания с синусоидальным нагружением мерзлых водонасыщенных образцов при температуре от 0 до $-2,4^{\circ}\text{C}$, переменным всесторонним давлением и нашли, что прочность уменьшается при вибродинамическом нагружении по сравнению со статическим нагружением.

Надеждин А.В. и Сорокин В.А. (1975) нашли, что прочностные свойства мерзлого грунта зависят от предварительного нагружения. Длительная прочность возрастает, а мгновенная прочность уменьшается при предварительном нагружении.

He, P. et al. (1993) исследовали динамические свойства мерзлого лесса из Лянчжоу (Китай) и нашли, что динамическая прочность мерзлого грунта уменьшается нелинейно с температурой, а ее зависимость от частоты может быть представлена в виде уравнения:

$$\sigma_f = A + Bf + Cf^2 + D \ln \left(1 + \frac{1}{\sqrt{t_f}} \right), \quad (6.2-1)$$

где t_f – время до разрушения; f – частота; σ_f – прочность; A , B , C , D – параметры, связанные с температурой и определяемые из опытов.

Shen & Zhang (1996) провели испытания на одноосное сжатие водонасыщенных мерзлых лессовых грунтов Лянчжоу при постоянной амплитуде деформации. Полученная зависимость между динамической прочностью σ_d и деформацией $\dot{\epsilon}_0$ имеет вид:

$$\sigma_d = K \dot{\epsilon}_0^n + C, \quad (6.2-2)$$

где K , n и C – параметры, связанные с частотой.

Shen & Zhang (1997a, 1997b, 1998) провели трехосные испытания мерзлого лесса из Лянчжоу по траектории сжатия (СТС) при циклической нагрузке и постоянной амплитуде деформации с целью оценить влияние всестороннего давления на динамическую прочность мерзлого грунта. Исследования показали влияние всестороннего давления на динамическую прочность мерзлого грунта. Динамическая прочность вначале увеличивается

с ростом всестороннего давления и затем уменьшается после достижения пикового значения всестороннего давления.

Zhao, S. et al. (2007) провели три группы различных циклических испытаний мерзлого ила из Шаньдун (Китай) с различной амплитудой напряжений. Была исследована зависимость между прочностью при динамической ползучести и временем до разрушения. Результатом исследований явилось уравнение

$$\sigma_f = \frac{k}{\ln\left(\frac{t_f}{t_0}\right)}, \quad (6.2-3)$$

где k и t_0 – параметры, определяемые из опытов.

Уравнения (6.2-1) и (6.2-3) показывают, что прочность при динамической ползучести мерзлого грунта уменьшается с ростом скорости образования дефектов/повреждений. Для различных грунтов оцениваемая прочность при динамической ползучести получается различной.

Wang, L. et al. (2005) также провели циклические испытания при постоянной амплитуде напряжений образцов мерзлого суглинка из основания железной дороги в провинции Цинхай (Тибет) и выявили различие между статической и динамической прочностью, также как и зависимость между временем вибрации и всесторонним давлением.

Zhang, S. (2008) провел испытания с использованием динамической трехосной установки с целью исследования процесса развития повреждений в образцах мерзлого эолового грунта из западной части провинции Ляонин (Китай). В опытах исследовался не только изменение параметра повреждений:

$$D = 1 - \frac{E_d}{E_0}, \quad (6.2-4)$$

где E_d – динамический модуль упругости; E_0 – начальный модуль упругости, но и микроструктурные изменения внутри образцы при помощи электронного микроскопа.

Результаты исследований показали, что процесс накопления повреждений в мерзлом эоловом грунте может быть разделен на три этапа. На стадии пластического деформирования скорость повреждений растет быстро, а параметр повреждений изменяется нелинейным образом. На стадии образования микротрещин рост повреждений относительно ровный и гладкий, и связь между параметром повреждений и деформацией примерно линейная. Микротрещины начинают развиваться от середины образца кольцевым образом с последующим образованием наклонных трещин по направлению к торцам образца (см., рис. 6.1-13).

В целом процесс накопления повреждений предложено оценивать путем изменения параметра повреждений на рассмотренных трех этапах, в виде

$$\left\{ \begin{array}{l} D_0 = 0,12 \quad \varepsilon \leq 0,02 \\ D_p = 1 - \frac{\sigma_d}{327,3\varepsilon_d^{1,56}} \quad 0,02 < \varepsilon_d < 0,05 \\ D = 1 - \frac{1}{E_0} \frac{0,0048}{(0,0048 + 0,02209\varepsilon_d)^2} \quad \varepsilon_d \geq 0,05 \end{array} \right. , \quad (6.2-5)$$

где $D_0 = 1 - E_d^2 / E_d^1 = 1 - 0,88 = 0,12$ – начальные повреждения; D_p – повреждения на стадии пластического деформирования; D – повреждения на стадии образования и развития микротрещин.

В 2015 году Tin et al. опубликовали результаты динамических трехосных испытаний мерзлого суглинка с целью исследования влияния циклов замораживания-оттаивания на динамические свойства грунта. Испытания выполнены на установке MTS-810 в Китайской академии наук (рис. 6.2-1). Эта установка включает низкотемпературную систему всестороннего давления, систему циркуляции хладагента и автоматическую систему контроля и сбора данных. Максимальная осевая нагрузка до 100 кН, боковое давление 0,3-20 МПа, максимальное осевое перемещение ± 85 мм, частота нагружения 0-50 Гц и диапазон температуры от комнатной до -30°C .

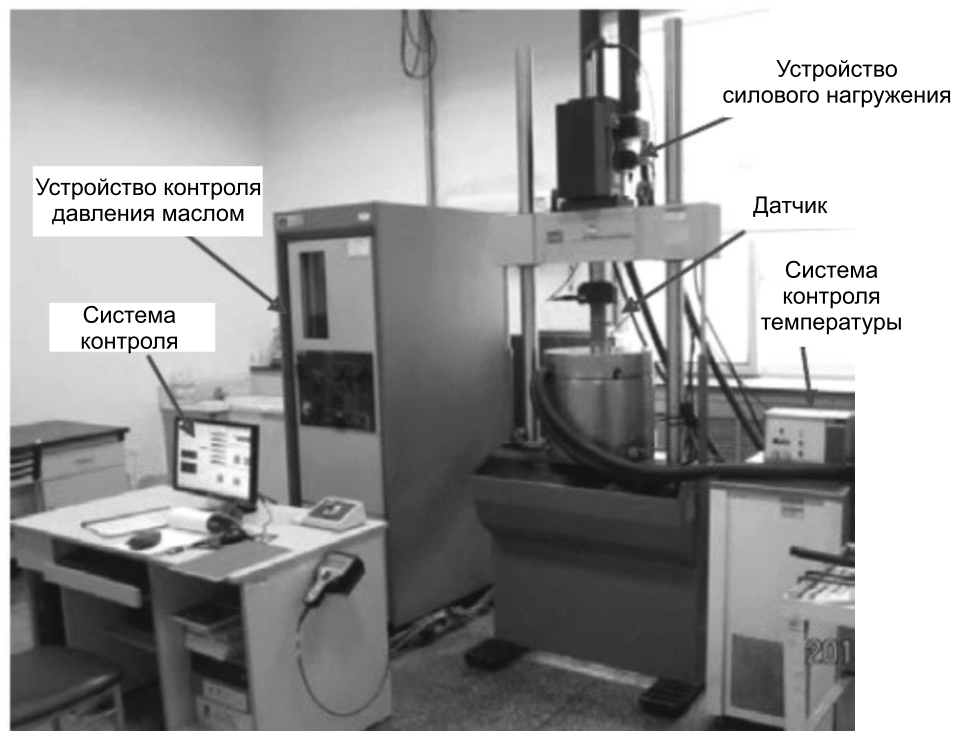


Рис. 6.2-1. Низкотемпературная установка для трехосных испытаний (Tin et al., 2015)

Так как исследования выполнялись с грунтами из основания железной дороги с сезонным замерзанием и оттаиванием, то испытания были выполнены при циклическом изменении температуры от -11 до $+20^{\circ}\text{C}$, различной амплитуде динамического напряжения и всестороннем давлении. Опыты показали рост аккумулируемой пластической деформации с увеличением количества циклов нагружения. В тоже время, с ростом количества циклов замораживания-оттаивания, изменяется напряженно-деформированное поведение суглинка от хрупкого к пластическому. С повышением температуры в течение оттаивания, накапливаемая пластическая деформация увеличивается, но зависимость между накапливаемой пластической деформацией и количеством вибраций остается в основном постоянной. Чем больше амплитуда динамического напряжения, тем больше влияние температуры при оттаивании на накапливаемую пластическую деформацию. С ростом температуры во время оттаивания, упругая деформация образцы увеличивается, а модуль деформации уменьшается.

6.3. Упругие динамические параметры и коэффициент демпфирования мерзлых грунтов

Упругие динамические параметры используются для описания деформационных свойств мерзлых грунтов при динамическом нагружении. К ним относятся упругий динамический модуль, динамический коэффициент Пуассона и динамический модуль сдвига.

Определение динамического упругого модуля

Динамический упругий модуль определяется из зависимости:

$$E_d = \frac{\sigma_t - \sigma_0}{\varepsilon_t - \varepsilon_0} = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_d}, \quad (6.3-1)$$

где σ_t и σ_0 – динамическое напряжение в вершине и начале петли гистерезиса, соответственно; ε_t и ε_0 – динамическая деформация в вершине и начале петли гистерезиса, соответственно.

Типичная зависимость «напряжение-деформация» при циклическом нагружении показана на рис. 6.3-1. Петля гистерезиса включает участок

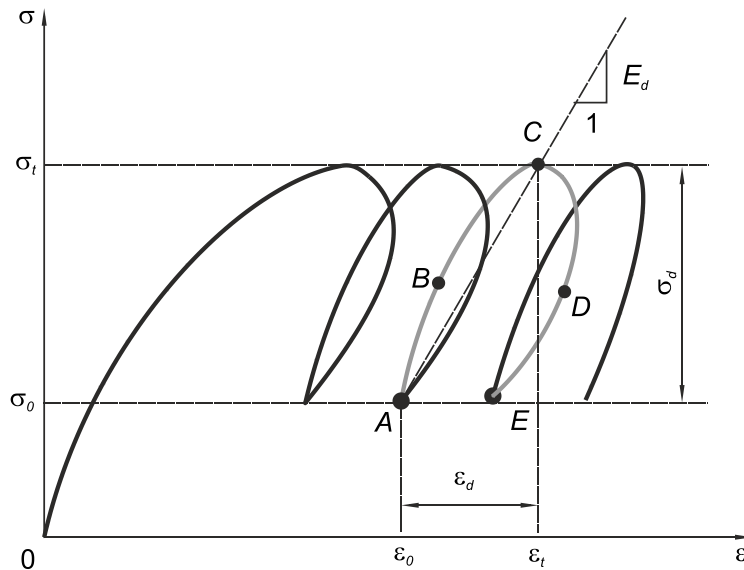


Рис. 6.3-1. К определению динамического упругого модуля

нагрузки ABC и разгрузки CDE и как видно из рисунка не имеет замкнутого цикла из-за образования остаточной деформации ε_d . Динамический упругий модуль, уравнение (6.3-1), определяется графически, как наклон линии AC .

Hardin & Drnevich (1972) предложили использовать гиперболическую зависимость для описания динамического модуля при циклическом нагружении:

$$\sigma_d = \frac{\varepsilon_d}{a + b\varepsilon_d}, \quad (6.3-2)$$

где a и b – параметры, определяемые путем подгонки данных испытаний к уравнению (6.3-2); ε_d – амплитуда динамической осевой деформации.

Из уравнений (6.6) и (7.7) можно получить:

$$E_d = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_d} = \frac{1}{a + b\varepsilon_d} \quad (6.3-3)$$

или

$$E_d = \frac{E_{d\max}}{1 + \left(\frac{E_{d\max}}{\varepsilon_{dult}}\right)\varepsilon_d} = \frac{E_{d\max}}{1 + \left(\frac{a}{b}\right)\varepsilon_d}, \quad (6.3-4)$$

где $E_{d\max}$ – максимум упругого динамического модуля; σ_{dult} – величина предельного динамического напряжения; ε_{dult} – величина предельной динамической деформации.

Зависимость между отношением текущего динамического модуля к максимальному динамическому модулю (динамический коэффициент жесткости) и динамической деформацией имеет вид:

$$\frac{E_d}{E_{d\max}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{a}{b}\right)\varepsilon_d} = \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_{dr}}}, \quad (6.3-5)$$

где ε_{dr} – величина отсчетной деформации сдвига и находится из зависимости:

$$\varepsilon_{dr} = \frac{\varepsilon_{dult}}{E_{d\max}} = \frac{a}{b}. \quad (6.3-6)$$

Динамический модуль сдвига (рис. 6.18) и динамическая деформация сдвига вычисляются по формулам:

$$\tau_d = \frac{\gamma_d}{a + b\gamma_d}; \quad (6.3-7)$$

$$\gamma_d = \varepsilon_d(1 + \mu); \quad (6.3-8)$$

$$G_d = \frac{\sigma_d}{2\varepsilon(1 + \mu)}, \quad (6.3-9)$$

где μ – динамический коэффициент Пуассона; ε_d и σ_d – амплитуда динамической осевой деформации и осевого напряжения, соответственно.

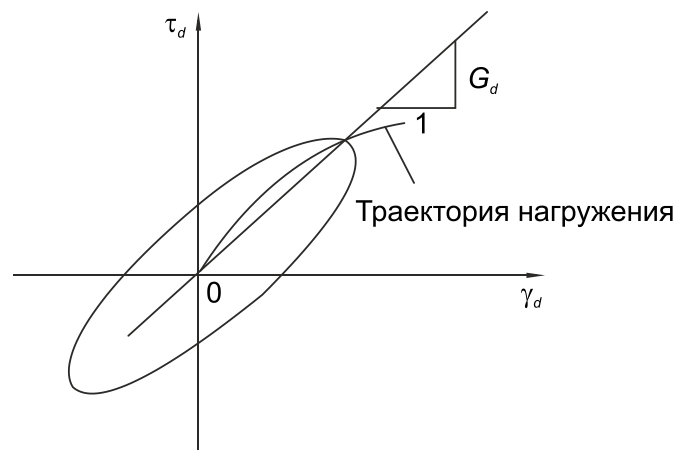


Рис. 6.3-2. К определению динамического модуля сдвига

Определение коэффициент демпфирования

Как показано на рис. 6.3-3, коэффициент демпфирования отражает затраты энергии при циклическом нагружении и может быть определен из уравнения:

$$\lambda = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W}, \quad (6.3-10)$$

где ΔW – площадь цикла $ABCDE$ и W – площадь прямоугольника ACF .

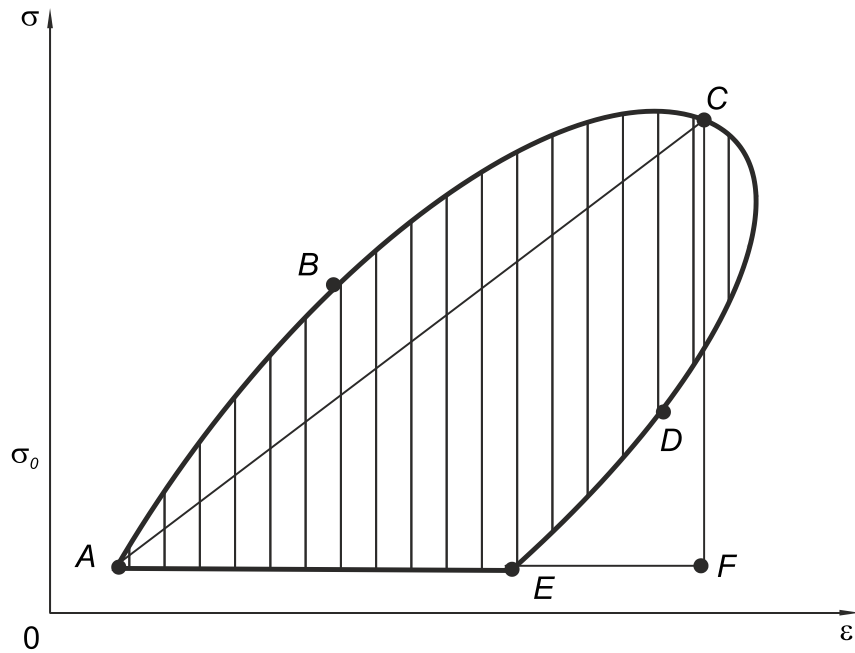


Рис. 6.3-3. К определению коэффициента демпфирования

Коэффициент демпфирования может быть найден как (Hardin & Drnevich, 1972):

$$\lambda = \lambda_{\max} \left(\frac{\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_{dr}}}{1 + \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_{dr}}} \right), \quad (6.3-11)$$

где λ_{\max} – максимальный коэффициент демпфирования.

He et al. (1993) исследовали влияние температуры, деформации и частоты на упругий динамический модуль мерзлых грунтов. Исследования показали уменьшение упругого динамического модуля мерзлого суглинка с ростом температуры и то, что зависимость между деформацией ε , частотой f и упругим динамическим модулем E имеет следующий вид:

$$E = A + B \ln f + C\varepsilon, \quad (6.3-12)$$

где A , B и C – параметры, определяемые опытным путем.

Xu & Zhong (1997), Xu et al. (1998), Ling et al. (2002), Zhao et al. (2003), Gao et al. (2010) также исследовали упругие динамические параметры мерзлых грунтов. Главными результатами является то, что динамические упругий и сдвига модули возрастают с понижением температуры и уменьшаются с ростом частоты вибрации (рис. 6.3-4). При одинаковых условиях упругие ди

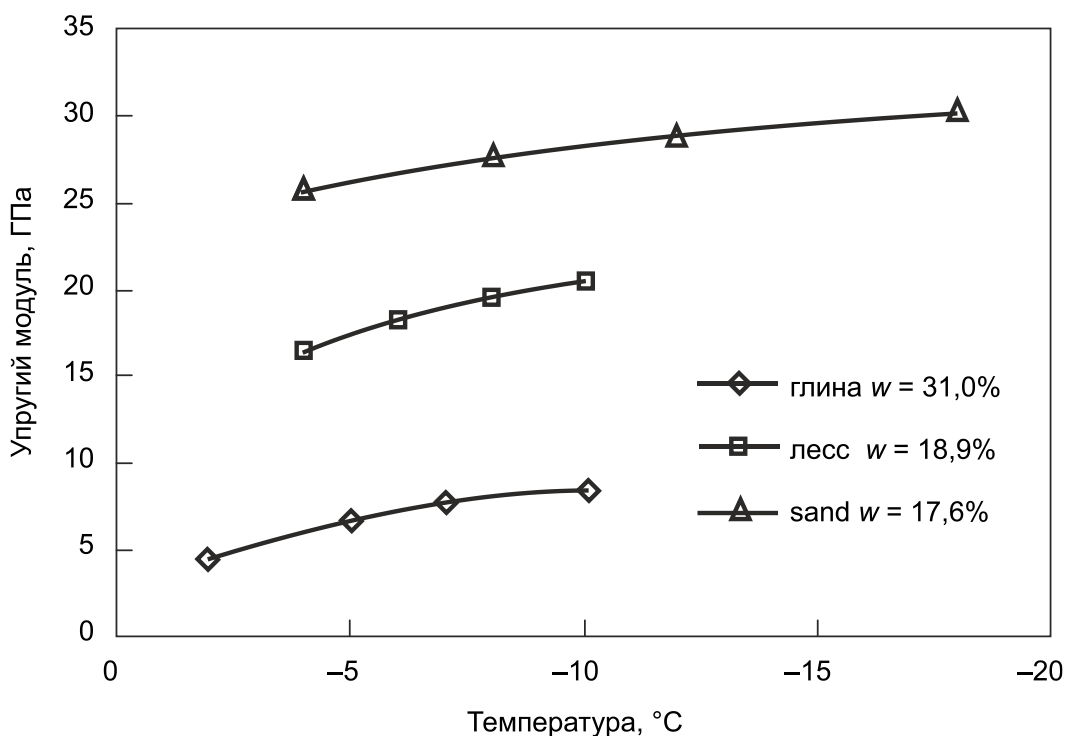


Рис. 6.3-4. Зависимость между динамическим упругим модулем и температурой (Wang, D. et al., 2003)

динамические модули мерзлого мелкозернистого песка оказываются больше, чем у мерзлой пылеватой глины. С ростом содержания влаги упругие динамические модули мерзлого грунта возрастают и достигают пикового значения вблизи полного водонасыщения (рис. 6.3-5).

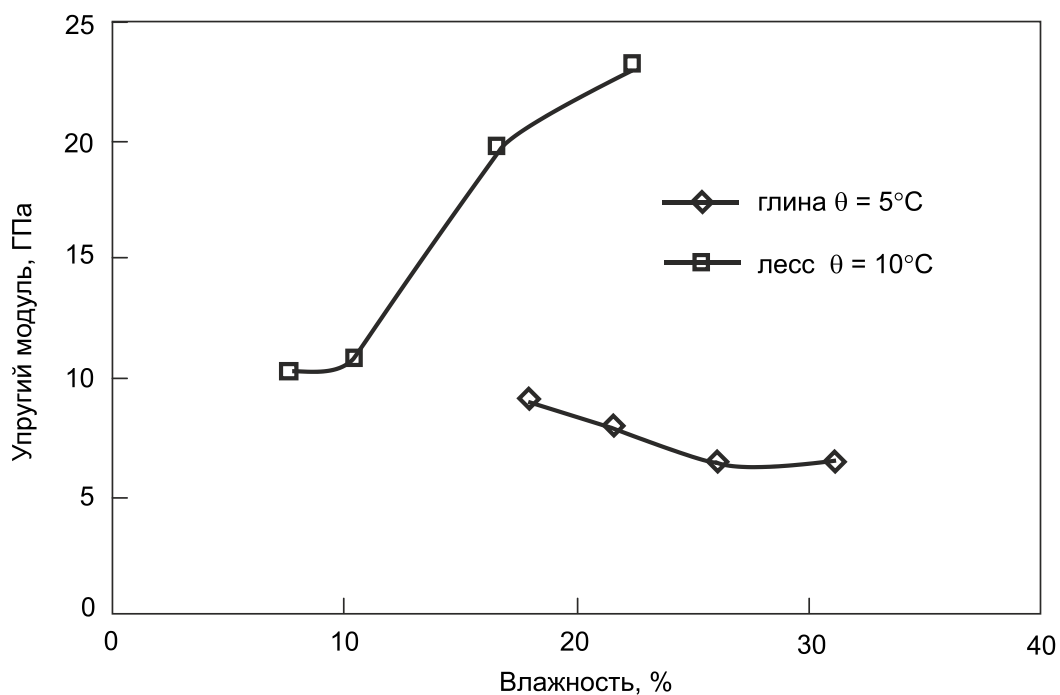


Рис. 6.3-5. Зависимость динамического упругого модуля от начальной влажности (Wang, D. et al., 2003)

Зависимость между динамическим упругим модулем и температурой, показанная на рис. 6.20, может быть представлена в виде уравнения:

$$E = A \ln T + B, \quad (6.3-13)$$

где T – абсолютное значение температуры, °C; A и B – параметры, связанные с типом грунта и содержанием влажности. Для крупнозернистых грунтов динамический модуль упругости более чем для глинистых грунтов.

Коэффициент демпфирования является показателем способности грунтов к поглощению энергии. На этот показатель оказывает влияние много факторов, такие как температура, частота нагружения, всестороннее давление, содержание влажности и др. Выполнив циклические испытания при постоянной амплитуде, Xu et al. (1998) выявили, что коэффициент демпфирования мерзлого грунта возрастает с температурой и уменьшается с частотой нагружения. Результаты динамических испытаний Xu et al. (2002) показывают, что коэффициент демпфирования мерзлых грунтов возрастает с температурой и уменьшается с частотой нагружения и то, что влияние времени вибрации нагрузки и содержания влажности незначительно.

Zhao et al. (2003) предложили зависимость между коэффициентом демпфирования η и частотой нагружения f в виде следующего уравнения:

$$\eta = A \ln f + B, \quad (6.3-14)$$

где A и B – параметры испытаний, связанные с температурой и видом грунта.

Gao et al. (2010) исследовали изменение коэффициента демпфирования от всестороннего давления и температуры и показали, что эти зависимости могут быть выражены квадратичными функциями, соответственно:

$$\eta = a_1 \sigma_3^2 + a_2 \sigma_3 + a_3; \quad (6.3-15)$$

$$\eta = b_1 \theta^2 + b_2 \theta + b_3, \quad (6.3-16)$$

где $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$ – параметры, определяемые из испытаний.

Wang et al. (2012, 2015) обнаружили, что динамический модуль глины заметно уменьшается, тогда как коэффициент демпфирования увеличивается после повторяющихся циклов замораживания-оттаивания и выравнивается после шестого цикла замораживания-оттаивания. Zhang, S. et al. (2008) проанализировал влияние циклов замораживания-оттаивания на динамический модуль сдвига и коэффициент демпфирования песчаных грунтов с помощью динамических трехосных испытаний. Он установил, что динамический модуль сдвига песчаных грунтов сначала увеличивается, а затем немного уменьшается с увеличением числа циклов замораживания-оттаивания. Коэффициенты демпфирования имели тенденцию к увеличению после повторных циклов замораживания-оттаивания.

An et al. (2015) провели испытания суглинка при циклическом замораживании-оттаивании с различной влажностью и частотой нагружения от 2 до 6 Гц. Зависимость между отношением E/E_{\max} (коэффициент жесткости) и динамической деформацией при различных влияющих факторах может быть аппроксимирована гиперболой, как показано на рис. 6.3-6. Коэффициент демпфирования уменьшается с ростом динамической деформации и возрастает с количеством циклов нагружения (рис. 6.3-7).

Несмотря на небольшие различия, коэффициент демпфирования имеет тенденцию к увеличению с ростом количества циклов замораживания-оттаивания для определенной динамической деформации. Более того, коэффициент демпфирования возрастает существенным образом после пяти циклов замораживания-оттаивания. Как и в случае с динамическим модулем упругости, возможная причина этого явления заключается в том, что после повторных циклов замораживания-оттаивания прочность и трение между частицами будут уменьшаться. Следовательно, образцы легко уплотняются, и упругая энергия уменьшается с увеличением числа повторяющихся циклов замораживания-оттаивания.

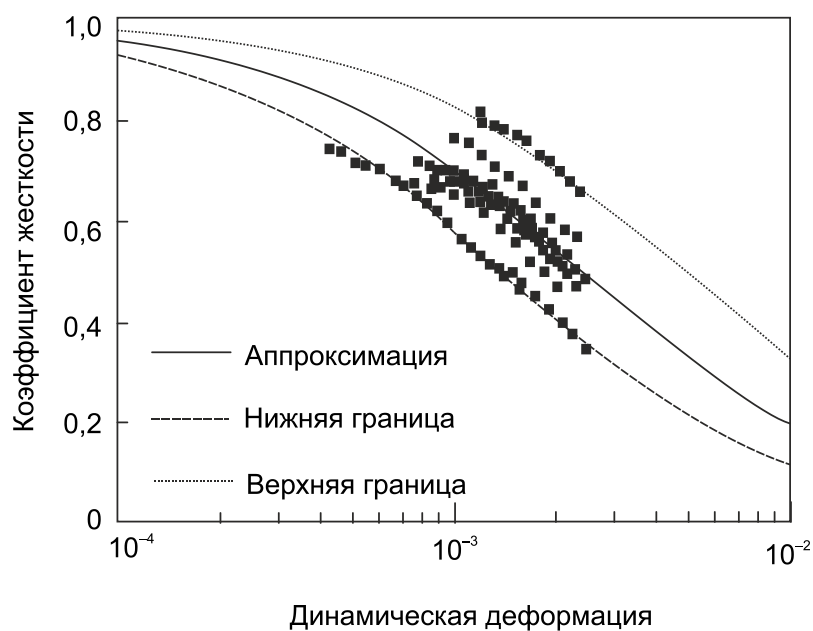


Рис. 6.3-6. Зависимость между динамическим коэффициентом жесткости и динамической деформацией (An et al., 2015)

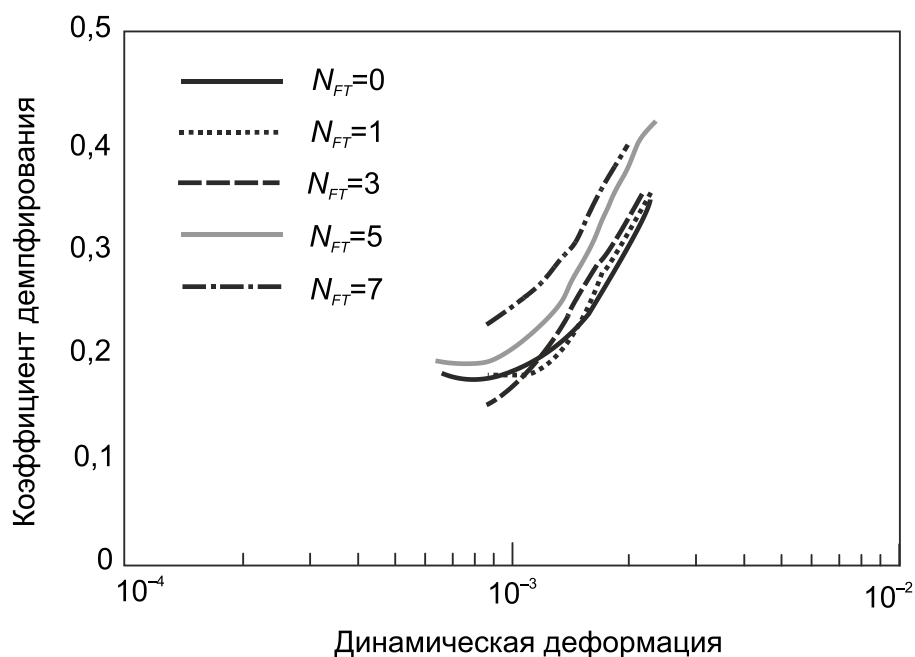


Рис. 6.3-7. Зависимость между динамическим коэффициентом демпфирования и динамической деформацией при различном количестве циклов замораживания-оттаивания (An et al., 2015)

Из рассмотренных исследований следует, что коэффициент демпфирования возрастает с ростом частоты нагружения или содержания влажности. Подобный вывод сделан в работе Li & Fan (2018). Они нашли, что при одной и той же температуре, частоте нагружения и содержании влажности динамический коэффициент демпфирования увеличивается с ростом всестороннего давления и, чем больше всестороннее давление, тем больше динамический коэффициент демпфирования.

В то же время, несколько иные выводы сделаны в работе Ling et al. (2015). Из их исследований следует, что динамический модуль сдвига увеличивается с ростом начального содержания влажности, температуры, частоты нагружения и всестороннего давления. Коэффициент демпфирования увеличивается с ростом содержания начальной влажности, в то время как уменьшается с ростом частоты нагружения и температуры. Эффект всестороннего давления на коэффициент демпфирования оказался незначительным.

6.4. Динамическая ползучесть мерзлых грунтов

Динамическая ползучесть зависит от многих факторов, в первую очередь это вид мерзлого грунта, вид нагрузки, частота и амплитуда.

He et al. (1995) провели одноосные вибрационные испытания мерзлых водонасыщенных илов с целью исследования влияния частоты вибрации на

ползучесть при постоянной амплитуде напряжений. Оказалось, что с ростом частоты возрастает минимальная скорость деформации, в то время как предельная деформация и время до разрушения уменьшаются.

Zhu et al. (1995) из опытов в условиях трехосного сжатия с образцами мерзлого ила обнаружили уменьшение скорости ползучести, а затем ее увеличение с ростом всестороннего давления. Позднее, основываясь на этих данных они предложили модель ползучести, которая описывает процесс ползучести до разрушения.

$$\varepsilon = A + Bt + C\sqrt[3]{t}, \quad (6.4-1)$$

где ε – осевая деформация; t – время нагружения; A , B , C – параметры, определяемые из испытаний.

В 2002 году Zhao, S. et al. провели исследования характеристик ползучести мерзлого песчаного грунта при динамической нагрузке. Результаты показывают, что, когда нагрузка увеличивается, предельная деформация возрастает, а время разрушения и скорость ползучести уменьшаются. Предельная деформация, время до разрушения и скорость ползучести уменьшаются с ростом температуры. Частота оказывает малое влияние на скорость ползучести. С ростом частоты предельная деформация и время уменьшаются. После определенного значения частоты дальнейшее влияние частоты оказывает незначительное влияние на ползучесть.

Механические свойства мерзлого грунта с ростом количества циклов нагружения изменяются. Динамическая жесткость образцов мерзлого песка уменьшается значительно с ростом количества циклов нагружения. Это частично объясняется возникновением и ростом микротрещин, уменьшающие жесткость грунта (Liu, E. et al., 2016).

Анализ выполненных исследований позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Количество циклов замораживания-оттаивания оказывает существенное влияние на накопленную деформацию при длительном воздействии динамической нагрузки.

2. По мере увеличения числа циклов замораживания-оттаивания режим разрушения мерзлого грунта постепенно изменяется от хрупкого разрушения до упруго-пластического.

3. Упругая деформация демонстрирует тенденцию к росту, после первых циклов замораживания-оттаивания, но модуль упругости снижается. Упругая деформация и модуль упругости не изменяются существенным образом с ростом количества циклов замораживания-оттаивания.

4. Частота оказывает малое влияние на скорость ползучести. Предельная деформация, время до разрушения и скорость ползучести уменьшаются с ростом отрицательной температуры.

5. Коэффициент демпфирования мерзлых грунтов возрастает с температурой и уменьшается с частотой нагружения. Коэффициент

демпфирования имеет тенденцию к увеличению с ростом количества циклов замораживания-оттаивания.

6. Всестороннее давление оказывает влияние на динамическую прочность мерзлого грунта. Динамическая прочность вначале увеличивается с ростом всестороннего давления, а затем уменьшается после достижения пикового значения всестороннего давления.

7. С ростом количества циклов нагружения образцы показывают упруго-пластическое и неупругое поведение, остаточная осевая деформация возрастает с постоянной скоростью вплоть до разрушения. Остаточная объемная деформация на начальных циклах положительна и затем расширяется (дилатансия) до полного разрушения образцов мерзлого песка.

8. Динамическая жесткость мерзлых образцов уменьшается быстро на начальных циклах и приближается постепенно к устойчивому состоянию с ростом циклов из-за образования микротрещин и деградации жесткости.

9. Динамические характеристики: упругий модуль, модуль сдвига, коэффициент Пуассона возрастают с ростом содержания влажности и понижением температуры, и их зависимость может быть описана линейным уравнением.