

УДК 624.131

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИСКУССТВЕННО ЗАМОРОЖЕННОЙ ПОЧВЫ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДИКИ РАЗРЕЗНОГО СТЕРЖНЯ ГОПКИНСОНА

Квин-Юонг Ма

Школа гражданского машиностроения и архитектуры
Аньхойского университета науки и технологии, 232001 Хуайнань, Китай
E-mail: qyma@aust.edu.cn

Приведены результаты экспериментов по деформированию замороженного грунта, полученные с использованием методики разрезного стержня Гопкинсона на сжатие с низкотемпературной камерой. Данные для падающей и отраженной волн получены с помощью датчиков деформации, данные для прошедшей волны — с помощью полупроводниковых тензодатчиков. Проведены эксперименты по статическому сжатию замороженного грунта при одной и той же температуре и скоростях деформирования 0,001 и 0,01 с⁻¹. Получены динамические диаграммы напряжение — деформация при скоростях деформирования 360 ÷ 1470 с⁻¹. Показано, что низкая температура соответствует высокой скорости деформирования, а высокая температура — низкой скорости деформирования. Установлено, что на процесс деформирования замороженного грунта оказывают влияние температура и скорость деформирования. Обнаружено, что различные динамические кривые зависимости напряжения от деформации, полученные при одной и той же температуре, но разных скоростях деформирования, сходятся. Результаты тестов показывают, что мерзлый грунт имеет как температурную, так и ударную хрупкость.

Ключевые слова: замороженный грунт, динамические свойства, разрезной стержень Гопкинсона на сжатие.

Введение. Изучение механических свойств замороженного грунта — достаточно новая область исследований. В настоящее время экспериментальные исследования мерзлого грунта проводятся в основном статическими методами [1, 2]. Динамические методы применяются, главным образом, при низких частотах и малой амплитуде волн. Однако при решении задач, требующих проведения работ в мерзлом грунте, необходимо изучать механические свойства грунта при ударных нагрузках. Подобное исследование образцов мерзлого грунта с Аляски выполнено в Сандийской национальной лаборатории США [3].

Целью данной работы является экспериментальное изучение влияния скорости деформирования и температуры на динамические свойства замороженного грунта. Эксперименты с замороженной глиной выполнены с использованием методики разрезного стержня Гопкинсона при различных температурах и скоростях деформирования. Эксперименты по статическому сжатию замороженной глины проведены при тех же температурах и двух значениях скорости деформирования с помощью машины для испытания материалов DCS-5000 (Япония).

Работа выполнена при финансовой поддержке Китайского национального фонда естественных наук (грант № 50874003).

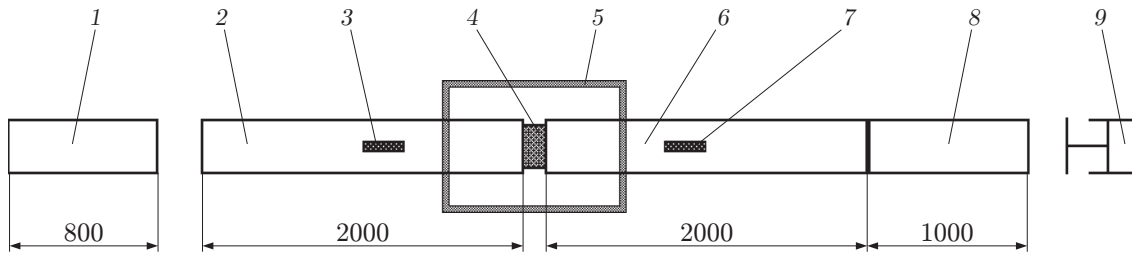


Рис. 1. Схема установки, используемой в опытах с замороженным грунтом: 1 — ударный стержень, 2 — подводный стержень, 3 — датчики деформации, 4 — образец замороженного грунта, 5 — низкотемпературная камера, 6 — отводящий стержень, 7 — полупроводниковые тензодатчики, 8 — отскакивающий стержень, 9 — буфер

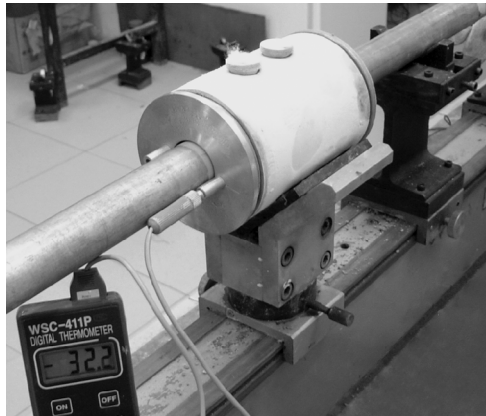


Рис. 2. Разрезной стержень Гопкинсона с паровым охладителем

1. Постановка экспериментов. Исследовались образцы глины, собранной в шахте провинции Аньхой на глубине $220 \div 225$ м. Плотность сухой глины 1710 кг/м^3 , влажность $21,42 \%$. Образцы диаметром 34 мм и длиной 18 мм замораживались в металлических изложницах в течение 24 ч . Затем изложницы удалялись, а образцы, предназначенные для динамических и статических экспериментов, продолжали замораживаться при той же температуре в течение еще 24 ч .

В качестве устройства для ударного сжатия использовался разрезной стержень Гопкинсона на сжатие диаметром 37 мм с паровым охлаждающим устройством (рис. 1, 2). Измерительные стержни были изготовлены из алюминия. Данные для падающей и отраженной волн получены с помощью датчиков деформации (тензодатчиков). Волновой импеданс замороженного грунта очень мал, и сигнал для прошедшей волны невелик, поэтому для регистрации профиля прошедшей волны использовались полупроводниковые тензодатчики.

Эксперименты проводились при семи значениях температуры: $T_0 = -5, -7, -10, -12, -15, -17, -20 \text{ }^\circ\text{C}$ и четырех значениях скорости деформирования $\dot{\epsilon}$ для каждого значения T_0 (см. таблицу). Статические эксперименты, с результатами которых сравнивались данные ударных опытов на сжатие, проведены при $\dot{\epsilon} = 0,001; 0,010 \text{ с}^{-1}$.

2. Анализ результатов экспериментов. Фотографии образцов по окончании экспериментов по статическому и динамическому сжатию приведены на рис. 3.

На рис. 4, 5 представлены зависимости напряжения от деформации при различных значениях температуры и скорости деформирования. На рис. 4 видно, что при одной и той же скорости деформирования $\dot{\epsilon}$ по мере уменьшения температуры испытаний напряжения

Средние значения скорости деформирования
в случае динамического нагружения
при различных значениях температуры

$T_0, ^\circ\text{C}$	$\dot{\epsilon}, \text{c}^{-1}$			
-5	350,	660,	1080,	1470
-7	350,	650,	1060,	1450
-10	260,	540,	1100,	1470
-12	270,	630,	1050,	1450
-15	260,	620,	1020,	1430
-17	280,	620,	1030,	1440
-20	300,	590,	980,	1440

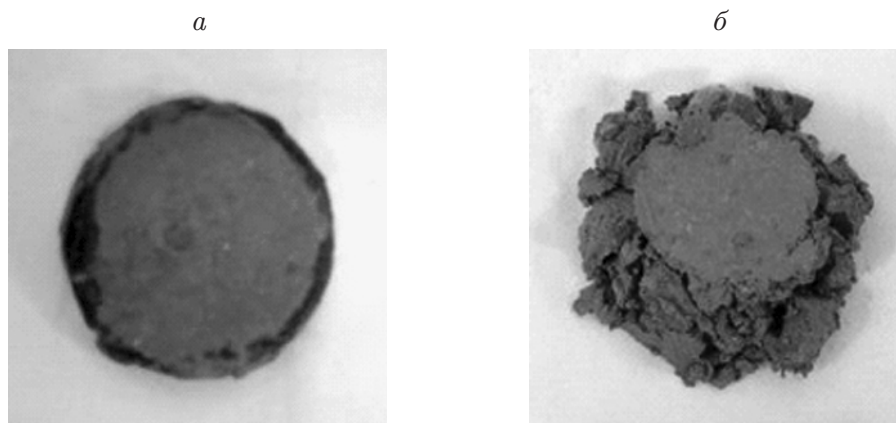


Рис. 3. Образцы после экспериментов на сжатие:

a — статическое сжатие при $T_0 = -20\text{ }^\circ\text{C}$; *б* — динамическое сжатие при $T_0 = -7\text{ }^\circ\text{C}$,
 $\dot{\epsilon} = 300\text{ c}^{-1}$

увеличиваются. Температура оказывает значительное влияние на статические и динамические механические свойства замороженного грунта. Из рис. 5 следует, что при одной и той же температуре испытаний по мере увеличения скорости деформирования механические напряжения увеличиваются. Скорость деформирования оказывает существенное влияние на статические и динамические свойства замороженного грунта.

Полученные зависимости показывают, что в случае мерзлого грунта имеет место температурно-временная аналогия. Низкая температура испытаний соответствует высокой скорости деформирования, и наоборот, высокая температура эквивалентна невысокой скорости деформирования. На рис. 4 видно, что при одной и той же скорости деформирования, но различных температурах испытаний динамические кривые зависимости напряжения от деформации сходятся. При этом чем выше скорость изменения деформации, тем лучше сходятся эти кривые, приближаясь к кривой, соответствующей наиболее высокой температуре.

На рис. 5 видно, что при одной и той же температуре, но различных скоростях деформирования динамические кривые зависимости напряжения от деформации также сходятся. Чем ниже температура испытаний, тем очевиднее, что кривые сходятся. Кривые сходятся к кривой, которой соответствует наименьшая скорость деформирования. Это обусловлено тем, что разрушение образцов оказывает незначительное влияние на их несущую способность, а также нестабильностью свойств замороженного грунта. Нестабильность не проявляется в квазистатических условиях (см. рис. 4, *a, б*), но имеет место при динамиче-

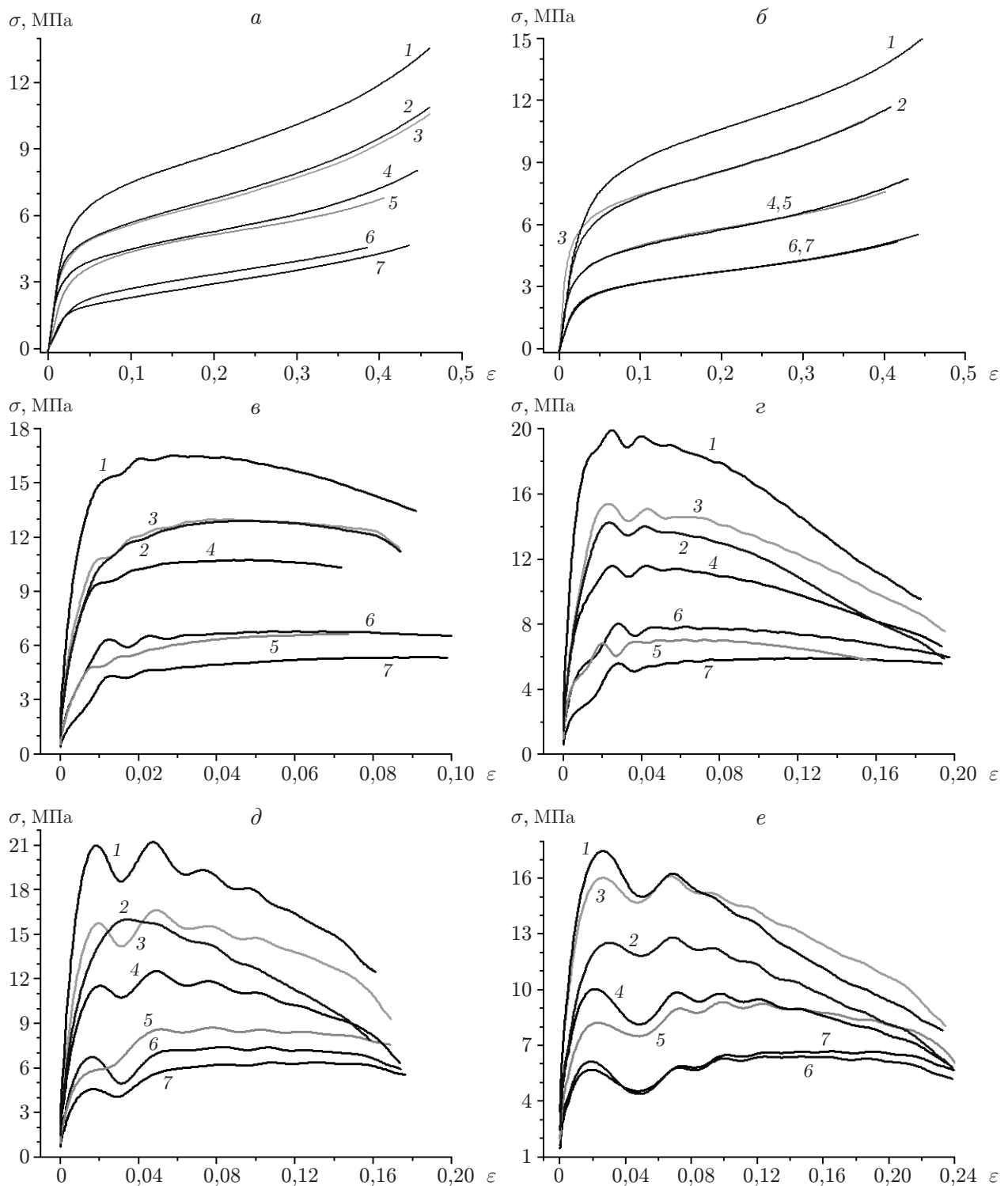


Рис. 4. Зависимость напряжения от деформации при различных температурах и скоростях деформирования:

a — $\dot{\epsilon} = 0,001 \text{ c}^{-1}$, *б* — $\dot{\epsilon} = 0,01 \text{ c}^{-1}$, *в* — $\dot{\epsilon} = 300 \text{ c}^{-1}$, *г* — $\dot{\epsilon} = 600 \text{ c}^{-1}$, *д* — $\dot{\epsilon} = 1050 \text{ c}^{-1}$, *е* — $\dot{\epsilon} = 1450 \text{ c}^{-1}$; 1 — $T_0 = -20 \text{ }^\circ\text{C}$, 2 — $T_0 = -17 \text{ }^\circ\text{C}$, 3 — $T_0 = -15 \text{ }^\circ\text{C}$, 4 — $T_0 = -12 \text{ }^\circ\text{C}$, 5 — $T_0 = -10 \text{ }^\circ\text{C}$, 6 — $T_0 = -7 \text{ }^\circ\text{C}$, 7 — $T_0 = -5 \text{ }^\circ\text{C}$

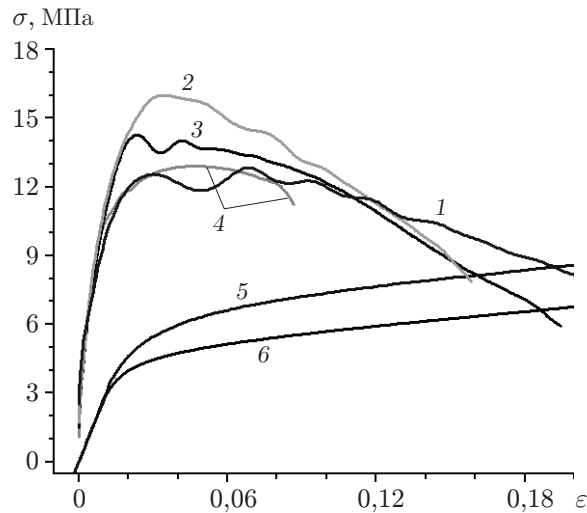


Рис. 5. Зависимость напряжения от деформации при $T_0 = -17^\circ\text{C}$ и различных скоростях деформирования:

1 — $\dot{\varepsilon} = 1445 \text{ c}^{-1}$, 2 — $\dot{\varepsilon} = 1028 \text{ c}^{-1}$, 3 — $\dot{\varepsilon} = 622 \text{ c}^{-1}$, 4 — $\dot{\varepsilon} = 284 \text{ c}^{-1}$, 5 — $\dot{\varepsilon} = 0,01 \text{ c}^{-1}$,
6 — $\dot{\varepsilon} = 0,001 \text{ c}^{-1}$

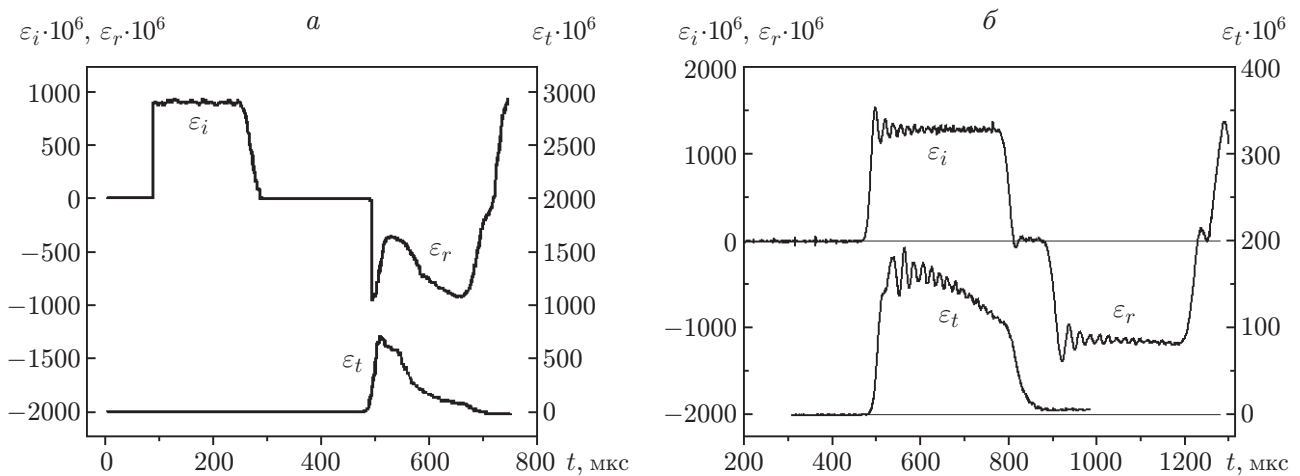


Рис. 6. Профили деформации в падающей (ε_i), отраженной (ε_r) и прошедшей (ε_t) волнах:

a — гранит [4]; *б* — замороженный грунт

ских испытаниях. Результаты экспериментов показывают, что для замороженного грунта имеет место и температурная, и ударная хрупкость, свидетельствующая о наличии температурно-временной аналогии для мерзлого грунта.

На динамических кривых зависимости напряжения от деформации, приведенных на рис. 4, 5, наблюдаются осцилляции, которые становятся более значительными при уменьшении температуры или увеличении скорости деформирования. Осцилляции не вызваны двумерными дисперсионными эффектами, возникающими вследствие распространения упругих волн в стержнях конечного диаметра, а обусловлены температурной и ударной хрупкостью мерзлого грунта. Для того чтобы подтвердить эти выводы, были проведены эксперименты по ударному сжатию образцов из мягких материалов, таких как пористый цемент из полиуретана или пористый алюминий, при тех же условиях экспериментов. Про-

фили прошедших волн являются гладкими. На профилях прошедших волн, полученных в экспериментах по ударному сжатию замороженного грунта, наблюдались осцилляции, которые обуславливают осцилляции на динамических кривых зависимости напряжения от деформации.

Хрупкость мерзлого грунта значительно меньше хрупкости горных пород [4]; для последних она имеет место даже в экспериментах по квазистатическому сжатию (рис. 6). Горная порода разрушается внезапно, а мерзлый грунт — медленно, но при понижении температуры или увеличении скорости деформирования мерзлый грунт разрушается значительно быстрее. На профилях прошедших волн амплитуда и период осцилляций увеличиваются.

Заключение. С использованием методики разрезного стержня Гопкинсона на сжатие исследованы образцы замороженного грунта при различных температурах и скоростях деформирования. При динамическом нагружении на свойства мерзлого грунта оказывают влияние температура испытаний и скорость деформирования. Кроме того, температура и скорость деформирования оказывают существенное влияние на зависимость напряжения от деформации. В случае мерзлого грунта это свидетельствует о наличии температурно-временной аналогии. Температурно-временная эквивалентность для мерзлого грунта обусловлена его температурной и ударной хрупкостью.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Xu Xueyan, Zhong Congli, Chen Yaming, Zhang Jiayi.** Research on dynamic characters of frozen soil and determination of its parameters // Chinese J. Geotech. Engng. 1998. V. 5, N 20. P. 77–81. In Chinese.
2. **Zhao Shuping, Zhu Yuanlin, He Pin, Yang Chengsong.** Recent progress and suggestion in the research on dynamic response of frozen soil // J. Glaciology Geocryology. 2002. V. 5, N 24. P. 681–686. In Chinese.
3. **Moo Y. Lee, Fossum A., Costin L. S., Bronowski D.** Frozen soil material testing and constitutive modeling: Report / Sandia nat. lab. USA. Sandia, 2002. SAND2002-0524.
4. **Liu Jianfei, Hu Shisheng, Hu Yuanyu, Zhao Jian.** Research on dynamic compressive testing and mechanics properties of granite // Chinese J. Rock Mech. Engng. 2000. V. 19, N 5. P. 618–621. In Chinese.

Поступила в редакцию 28/V 2009 г.
