

УДК 624.154.5

DOI: 10.17213/mgvgif/2026-5-218-223

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ МЕТОДОМ ТРЕХОСНОГО СЖАТИЯ

Р. Ф. Шарафутдинов, Э. С. Гречищева, Р. В. Махота

¹ Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений им. Н. М. Герсеванова – АО «НИИЦ «Строительство», г. Москва, Россия

Аннотация. *Определение предельно-длительных прочностных характеристик одна из важных проблем при строительстве на многолетнемерзлых грунтах. Традиционно, она определяется на основе одноосного сжатия и включает модифицированный прочностной параметр по теории прочности Мизеса или Треска, зависящий от времени, но не зависящий от напряжённого состояния. Подобных теорий достаточно для легких сооружений, которые активно строятся в зоне распространения мерзлых грунтов. Однако, для сложных сооружений с высокими нагрузками требуется использование более комплексного критерия прочности, зависящего от напряжённого состояния и времени действия нагрузки. Параметры теорий прочности, учитывающих зависимость от напряженного состояния (например, Мора-Кулона, Друкера-Прагера) определяются на основе осесимметрического трехосного сжатия.*

Приведены результаты исследований прочности мерзлого грунта методом трехосного сжатия. Исследование включало испытания грунтов различного гранулометрического состава как в статическом, так и в кинематическом режимах. Особое внимание уделено проведению испытаний и алгоритмам обработки результатов при кинематическом режиме. Испытания проведены на модельных грунтах: песке средней крупности, песке пылеватом, суглинке легком. Для всех испытаний выбраны идентичные условия: боковое давление составило 0,1, 0,3 и 0,5 МПа, скорость деформирования образца – 0,1 мм/мин, 0,01 мм/мин и 0,001 мм/мин. Всего проведено более 100 испытаний. Результаты лабораторных исследований обобщены зависимостью прочности образца от времени до его разрушения. Предложена формула для расчета предела длительной прочности на основе серии краткосрочных испытаний.

Ключевые слова: *многолетнемерзлый грунт, прочность, механика грунтов, трехосное сжатие, лабораторные исследования грунтов*

ANALYSIS OF LONG-TERM STRENGTH OF FROZEN SOILS USING TRIAXIAL TESTING

R. F. Sharafutdinov, E. S. Grechishcheva, R. V. Makhota

Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP) – Research Centre for Construction (JSC NITs Stroitelstvo), Moscow, Russia

Annotation. *The long-term strength of frozen soils is one of the main problems in geotechnical engineering in permafrost zone. Traditionally, modified time-depended von Mises or Trescá failure criterion is widely used for frozen soils, and the long-term strength parameters are determined based on uniaxial compression testing. The main feature of the von Mises and the Trescá failure criteria is their independence from the confining stresses. It is sufficient for lightweight structures that are actively built in the permafrost zone. However, for complex and heavy structures a more comprehensive failure criterion is required that takes into account*

stress state and load duration. The failure criteria parameters, which depend on stress state (such as Mohr-Coulomb or Drucker-Prager criteria), are typically determined using axisymmetric triaxial testing. The paper presents the results of triaxial tests on frozen soils performed in both stress-controlled and strain-controlled loading mode. The focus was given to strain-controlled test procedure and subsequent data processing. Soil specimens comprising medium sand, silty sand and silty lean clay were subjected to tests. The degree of water saturation was not less than 0.8 %. Triaxial tests were performed under confining pressure of 0.1, 0.3 and 0.5 MPa and with the strain rate of 0.1, 0.01 and 0.001 mm/min. More than 100 tests were performed. The derived dependence of specimen strength on failure time has summarized the tests results. An equation for calculating the long-term permafrost soil strength based on a series of short-term triaxial tests is proposed.

Keywords: frozen soil, triaxial testing; soil strength; soil mechanics; triaxial testing; laboratory research of soils

Введение

Трехосное сжатие мерзлых грунтов – один из наиболее перспективных и комплексных методов лабораторных исследований. Метод дает возможность исследований свойств грунтов при различных траекториях и режимах нагружения. Как правило, испытания методом трехосного сжатия выполняются в осесимметричной постановке путем разрушения образцов вертикальной нагрузкой при постоянном поддержании бокового давления [1–4]. Перспективным для многолетнемерзлых грунтов является метод испытания с передачей нагрузки на образец с постоянной скоростью. Однако стандартизация этого метода нагружения при трехосном и одноосном сжатии сдерживается ввиду недостаточного объема исследований при этом виде нагружения и корректности интерпретации результатов. В работе приведены результаты исследования влияния кинематического приложения нагрузки и получаемые прочностные характеристики мерзлых грунтов, а также предложена формула для определения длительной прочности мерзлого грунта на основе серии испытаний с различной скоростью деформирования образца.

Объект и методика исследований

Исследования выполнялись для песков и суглинков, которые были отобраны на объектах, расположенных в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов Севера России. Кумулятивная кривая гранулометрического состава приведена на рис. 1.

Плотность и влажность были заданы искусственно для получения образцов слабодистых грунтов со степенью заполнения пор льдом и незамерзшей водой более 80 %.

Образцы нагружались в приборах трехосного сжатия при трех значениях скорости деформирования, мм/мин: 0,001; 0,01; 1 при трех значениях бокового давления, МПа: 0,1; 0,3; 0,5 (рис. 2).

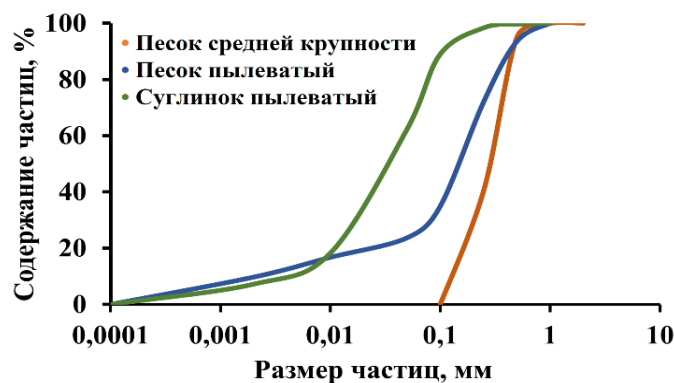


Рис. 1. Кумулятивная кривая гранулометрического состава грунтов

Также параллельно проводились испытания в статическом режиме ступенями 0,05 МПа, 0,06 МПа и 0,1 МПа при боковом давлении 0,1 МПа, 0,3 МПа и 0,5 МПа соответственно. Критерием завершения испытания являлась относительная вертикальная деформация 20 %.



Рис. 2. Прибор трехосного сжатия мерзлых грунтов

Результаты и обсуждение исследований

Анализ результатов испытаний проводился с учетом нескольких параметров, традиционно рассматривающихся при обработке испытаний методами одноосного и трехосного сжатия. В соответствии с ГОСТ 12248.9-2020 прочность грунта на сжатие определяется как значение вертикального напряжения на той ступени, после которой происходит увеличение скорости деформирования образца, то есть переход к стадии незапускающей ползучести. По аналогии с данным параметром анализировалась прочность грунта q_f (рис. 3, а) при ступенчатом нагружении методом трехосного сжатия.

И в ступенчатом, и в кинематическом режимах нагружения однозначно можно определить параметр q_p - максимальное значение девиатора напряжений в испытании методом трехосного сжатия (рис. 3, б), которое обуславливает достижение разрушения образца. Большое внимание в исследовании уделялось сравнению этого параметра, полученного при различных видах нагружения.

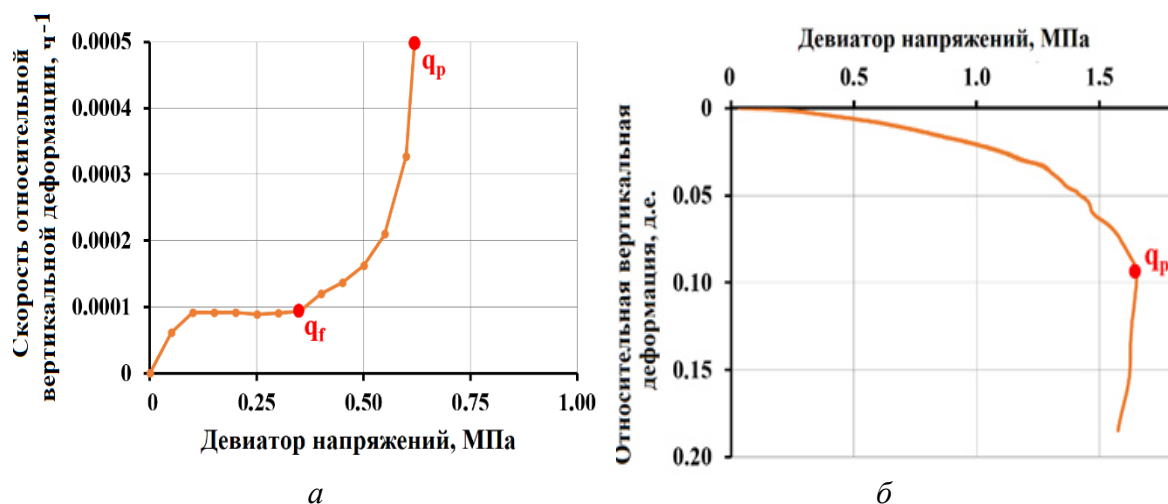


Рис. 3. Реологическая кривая при ступенчатом (а) кинематическом (б) способе приложения нагрузки на образец песка средней крупности

Значение q_p зависит от времени приложения нагрузки вне зависимости от вида нагружения. Поэтому далее в анализе данных рассматривалась зависимость максимального девиатора напряжений как от скорости деформирования образца, так и от времени приложения нагрузки (что немало важно при учете реологических процессов в мерзлых грунтах).

Анализ данных проводился на основе зависимостей, построенных в координатах « $q_p - \dot{\epsilon}$ » (рис. 4).

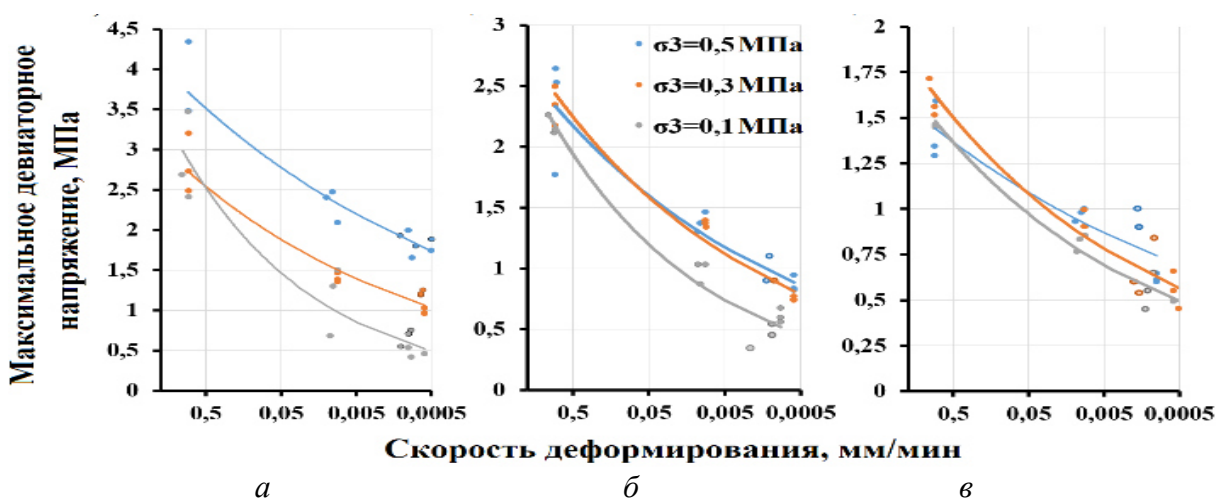


Рис. 4. Зависимость максимального девиаторного напряжения от скорости деформирования образца: а – песок средней крупности; б – песок пылеватый; в – суглинок пылеватый легкий

При этом, результаты испытаний в кинематическом и ступенчатом режиме нагружения при одинаковом значении бокового давления объединялись в одну выборку. Для каждой выборки была подобрана функция, описывающая закон изменения максимального значения девиатора от скорости деформирования образца. Рассматривались логарифмическая, степенная и экспоненциальная функции.

На основе анализа подобранных эмпирических уравнений функций установлено, что для описания зависимости « $q_p - t$ » наиболее корректной является степенная функция, которой соответствуют наибольшие значения коэффициентов детерминации $R^2 = 0,86-0,93$ (табл. 1).

Таблица 1. Результаты сравнения опытных данных по эмпирическому уравнению степенной функции для песка средней крупности

Уравнение функции	Вычисленные эмпирические коэффициенты к функциям и коэффициент детерминации			Пиковая длительная прочность q_{pt} в зависимости от времени, лет, МПа				Длительная прочность q_p при ступенчатом нагружении, МПа
	a	b	R^2	10	30	50	100	
$\sigma_3 = 0.1$ МПа								
$q_\infty = a(t)^b$	1.82	-0.21	0.86	0.170	0.135	0.122	0.105	0.667
$q_\infty = a \exp(bt)$	1.68	-0.004	0.58	0	0	0	0	
$q_\infty = a \ln(t) + b$	-0.29	2.14	0.87	-1.174	-1.494	-1.642	-1.844	
$\sigma_3 = 0.3$ МПа								
$q_\infty = a(t)^b$	2.16	-0.12	0.92	0.577	0.508	0.478	0.441	1.213
$q_\infty = a \exp(bt)$	1.98	0.001	-0.53	0	0	0	0	
$q_\infty = a \ln(t) + b$	-0.21	2.30	0.89	-0.091	-0.322	-0.429	-0.575	
$\sigma_3 = 0.5$ МПа								
$q_\infty = a(t)^b$	3.14	-0.1	0.93	1.077	0.972	0.926	0.868	1.807
$q_\infty = a \exp(bt)$	2.81	0.001	-0.47	0	0	0	0	
$q_\infty = a \ln(t) + b$	-0.25	3.25	0.90	0.360	0.081	-0.048	-0.224	

При этом описание испытаний логарифмической функцией характеризуется более высокой интенсивностью снижения q_p с ростом времени приложения нагрузки, что с одной стороны может давать более консервативную оценку, а с другой, в условиях длительной эксплуатации объектов может приводить к отрицательным значениям прочности. Экспоненциальная функция некорректно описывает экспериментальные данные, носит затухающий характер, а величина прогнозируемой длительной прочности стремится к отрицательным значениям.

Выводы

Проведена оценка длительной прочности по величине времени разрушения, в процессе которой впервые установлена взаимосвязь параметра максимального девиатора напряжений q_p , определяемого в кинематическом режиме, и нагрузки при 20 % относительной осевой деформации, определяемой в статическом режиме испытания.

Для учета фактора времени предложено аппроксимировать полученные значения параметра прочности степенной функцией для расчета длительной прочности на время эксплуатации проектируемого сооружения.

Список источников

1. Baker, T.H.W.(1978) Strain rate effect on the compressive strength of frozen sand//Proc. 1st Int. Symp. on Ground Freezing, -Pp.223-231.
2. Li, Hongsheng & Yang, Haitian & Chang, Cheng & Sun, Xioutang. (2001). Experimental Investigation on Compressive Strength of Frozen Soil versus Strain Rate. Journal of Cold Regions Engineering - J COLD REGIONS ENG. 15. 10.1061/(ASCE)0887-381X(2001)15:2(125).
3. Re, Gregory & Germaine, John & Ladd, Charles. (2003). Triaxial Testing of Frozen Sand: Equipment and Example Results. Journal of Cold Regions Engineering - J COLD REGIONS ENG. 17. 10.1061/(ASCE)0887-381X(2003)17:3(90).
4. Parameswaran, Vetkav R. (1980) "Deformation behaviour and strength of frozen sand." Canadian Geotechnical Journal 17 - p.74-88
5. ASTM D7300-11. Standard Test Method for Laboratory Determination of Strength Properties of Frozen Soil at a Constant Rate of Strain
6. Bragg, R. A., and Andersland, O. B. (1980) "Strain Rate, Temperature, and Sample Size Effects on Compression and Tensile Properties of Frozen Soil," Proceedings, Second International Symposium on Ground Freezing, Trondheim, Norway, pp. 34-47.
7. Rafael Sharafutdinov, Andrey Alekseev, Erika Grechishcheva and Roman Makhota. ANALYSIS OF LONG-TERM STRENGTH OF FROZEN SOILS USING STRAIN-CONTROLLED TRIAXIAL TESTING; Proceedings, 7th International Symposium on Transportation Soil Engineering in Cold Regions TRANSOILCOLD2025, 17-20 September 2025, p.116.

© Шарафутдинов Р. Ф., Гречищева Э. С., Махота Р. В., 2026