

УДК 624.139

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ И ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАСОЛЕННЫХ МЕРЗЛЫХ ПЫЛЕВАТО-ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ

Проведены экспериментальные исследования по изучению влияния засоленности Na_2SO_4 и всестороннего давления на деформационные и прочностные характеристики мерзлых пылевато-песчаных грунтов при -6°C . Показано, что начальный модуль упругости слабо зависит от всестороннего давления и возрастает с увеличением содержания соли. Увеличение всестороннего давления приводит к росту прочности. С ростом засоленности сцепление мерзлого грунта сначала увеличивается, а затем уменьшается, в то время как угол внутреннего трения и общая прочность сначала уменьшается, а затем увеличивается.

ХУ КАЙ

Университет Китайской Академии наук (Пекин, Китай).

ЧЭНЬ СЯОЦИН

Лаборатория горных опасностей и поверхностных процессов Института горных опасностей и окружающей среды Китайской Академии наук (Чэнду, Китай).

ЧЭНЬ ЯАНГАН

Лаборатория горных опасностей и поверхностных процессов Института горных опасностей и окружающей среды Китайской Академии наук (Чэнду, Китай).

Введение

Многочисленные эксперименты [1...12] показали, что деформационные и прочностные характеристики мерзлого грунта зависят от влажности, размера частиц и содержания соли, а также температуры, скорости деформирования и гидростатического давления.

Одним из важнейших факторов является засоленность. При строительстве в холодных регионах засоленные грунты чаще подвержены пучению, просадке и другим неблагоприятным процессам [12...16]. Никсон и Лем [17] показали, что повышение концентрации солей в грунте приводит к увеличению скорости ползучести при одноосном сжатии и значительному снижению прочности и несущей способности. Согласно Хивон и Сего [18], которые исследовали влияние типов грунта, температуры и солености на прочность мерзлых грунтов при одноосном сжатии, при увеличении температуры и солености происходит резкое уменьшение прочности. Бинг и Ма [19] показали, что температура замерзания грунта уменьшается с увеличением содержания соли. В [20] показано, что тип грунта и содержание солей являются главными факторами, влияющими на деформирование грунта. В [21] отмечено, что зависимость между прочностью на сжатие и температурой носит линейный характер. В [22] показано, что начальный модуль упругости и прочность мерзлого грунта растут с уменьшением содержания соли и температуры. При исследовании влияния NaCl и Na_2SO_4 на прочность при одноосном сжатии мерзлого грунта в [23] показано, что прочность уменьшается экспоненциально с увеличением содержания хлорида натрия. В то же время, с увеличением содержания Na_2SO_4 в диапазоне 0,0...0,5% она уменьшается, а в диапазоне 1...3% – увеличивается.

В последние годы проводились эксперименты по исследованию механических свойств грунтов, подвергнутых глубокой искусственной заморозке [5, 7, 9].

Исследования механических свойств искусственно замороженных грунтов показали, что с увеличением обжимающего давления его прочность сначала увеличивается, а затем уменьшается [24...29]. Давление, при котором проводились эти исследования, как правило, превышали 2 МПа.

В настоящем исследовании была проведена серия испытаний на трехосное сжатие засоленных мерзлых пылевато-песчаных грунтов с разным содержанием Na_2SO_4 при -6°C . Проанализированы результаты применения улучшенной гиперболической модели Дункан-Чанга [28], а также исследовано влияние всестороннего давления и содержания Na_2SO_4 на прочность. Зависимость параметров прочности от содержания соли была проанализирована с учетом линейного критерия Кулона-Мора.

Таблица 1

Пылеватый песок	Процентное содержание фракций, мм				
	< 0,075	0,075-0,1	0,1-0,25	0,25-0,5	0,5
Засоленный	46,74	8,50	33,31	10,40	1,04
Обессоленный	29,71	10,29	44,89	13,24	1,84

Таблица 2

Ионы	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
Процентное содержание ионов	0,004	0,514	0,001	0,011	0,121	0,553	0,012	0,005	0,029

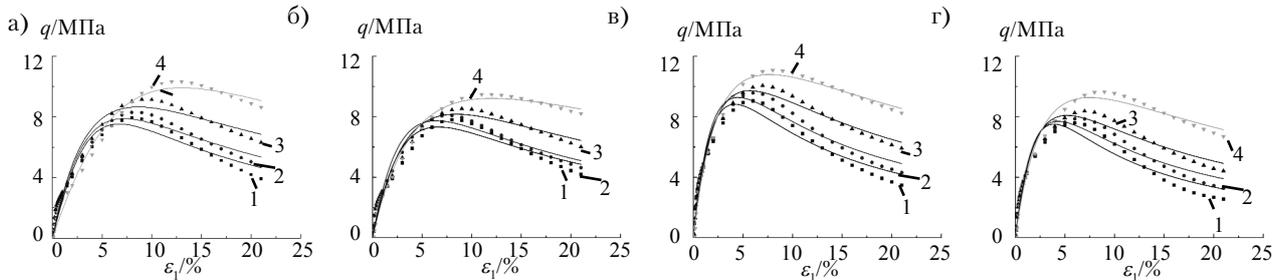


Рис. 1. Расчетные и экспериментальные кривые напряжение-деформация мерзлых пылеватых песков при содержании Na₂SO₄: 0 (а); 0,5 (б); 1,5 (в) и 2,5% (г) и обжимающих давлениях 0,3 (1); 0,5 (2); 1,0 (3) и 2,0 МПа (4)

Материал и методы испытаний

Образцы грунта, отобранные в провинции Цинхай, Китай, высушивались, измельчались и просеивались до фракции менее 2 мм (табл. 1). Содержание соли определялось ионным хроматографом ICS3000 (табл. 2), а распределение размера зерен – лазерным анализатором MS2000.

Чтобы оценить влияние содержания Na₂SO₄ и всестороннего давления на деформационные и прочностные характеристики грунта, проводились трехосные испытания на сжатие замороженных пылеватых песков с различным содержанием Na₂SO₄ (0; 0,5; 1,5 и 2,5% массы песков) под давлениями: 0,3; 0,5; 1 и 2 МПа.

Из смеси природного засоленного грунта и дистиллированной воды готовили тестовую смесь. После отстаивания в течение 24 ч. верхний слой воды удалялся, затем снова добавляли дистиллированную воду. Процесс повторялся до тех пор, пока электропроводность верхнего раствора не становилась стабильной, а содержание соли достигало значений менее 0,1%. Затем готовились образцы с разным содержанием Na₂SO₄.

Подготовленную грунтовую смесь заливали в цилиндрическую форму диаметром 6,18 см, высотой 18,0 см, тремя равными слоями, которые уплотнялись до заданной плотности (высота 12,5 см). Образцы были заморожены при температуре -30°С в течение 24 ч. Затем образцы без цилиндров были помещены в инкубатор более чем на 12 ч при температуре -6°С.

После стабилизации температуры (-6°С) образец помещался в барокамеру. Осевая нагрузка прикладывалась после пятиминутного воздействия всестороннего давления (0,3; 0,5; 1 и 2 МПа). Осевая скорость перемещения составила 1,25 мм/мин. Осевые перемещения во времени, осевые усилия, боковые перемещения и гидростатическое давление фиксировались автоматически. Осевая нагрузка прекращалась, когда осевая деформация достигала примерно 20%.

Результаты и обсуждение

В трехосных испытаниях на сжатие осевая и объемная деформации при различных всесторонних давлениях определялись опытным путем. Эквивалентное напряжение

$$q = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}, \tag{1}$$

где σ_1 , σ_2 и σ_3 – главные напряжения. В этой статье $q = \sigma_1 - \sigma_3$.

Экспериментальные кривые зависимости эквивалентного напряжения от осевой деформации засоленных мерзлых пылеватых песчаных грунтов с различным содержанием Na₂SO₄ представлены на рис. 1.

Таблица 3

Содержание соли, %	Параметры мерзлых пылеватых песков				
	σ_3 , МПа	l , МПа	m , МПа	n , МПа	коэффициент корреляции R^2
0	0,3	0,00847	0,01889	0,38351	0,96543
	0,5	0,00662	0,03119	0,34485	0,97554
	1	0,00417	0,04356	0,40597	0,97541
	2	0,00307	0,02079	0,52137	0,98774
0,5	0,3	0,00708	0,04247	0,31272	0,94004
	0,5	0,0066	0,04452	0,27266	0,96506
	1	0,00439	0,04824	0,31379	0,98092
	2	0,00236	0,05172	0,3419	0,99207
1,5	0,3	0,00931	0,03545	0,16315	0,94325
	0,5	0,00741	0,04123	0,15015	0,95258
	1	0,00498	0,04614	0,16185	0,98194
	2	0,00289	0,04831	0,17058	0,99293
2,5	0,3	0,01023	0,02648	0,15668	0,92236
	0,5	0,00766	0,0377	0,14337	0,94276
	1	0,00539	0,0427	0,14684	0,96778
	2	0,00296	0,0419	0,16699	0,98632

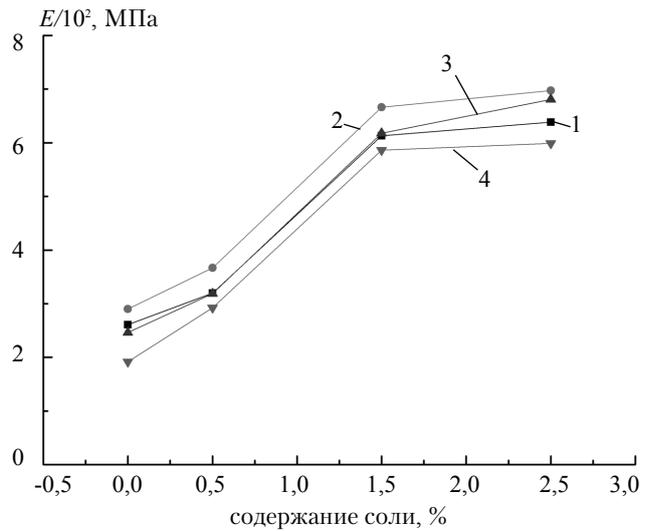


Рис. 2. Зависимость начального модуля упругости от содержания соли: при $q = 0,3$ (1); $0,5$ (2); $1,0$ (3) и $2,0$ (4) МПа

На кривых выделяются три этапа: линейная упругая стадия, нелинейная (упрочнения) и стадия разупрочнения. В начальной линейной стадии осевая деформация – менее 1%. В нелинейной стадии увеличение эквивалентных напряжений приводит к постепенному замедлению роста напряжения. Однако напряжение продолжает возрастать до тех пор, пока не достигнет максимума, при котором начинают разрушаться кристаллы льда и цементационные связи между частицами. В стадии разрушения напряжение уменьшается с увеличением осевой деформации до полного разрушения.

Для моделирования начальной стадии напряженно-деформированного состояния мерзлых пылеватых песков применялась модифицированная гиперболическая модель Дункан-Чанга [28, 29]

$$q = \frac{\varepsilon_1}{l\varepsilon_1^2 + m\varepsilon_1 + n}, \quad (2)$$

где l , m и n – параметры грунта (табл. 3).

Дифференцируя (2), получим

$$\frac{dq}{d\varepsilon_a} = \frac{-l\varepsilon_a^2 + n}{(l\varepsilon_a^2 + m\varepsilon_a + n)^2}. \quad (3)$$

Согласно определению начального модуля упругости E_0

$$E_0 = 100 \left. \frac{dq}{d\varepsilon_a} \right|_{\varepsilon_a=0} = \frac{100}{n}. \quad (4)$$

Коэффициент 100 введен для получения осевой деформации в процентах. Точный начальный модуль упругости может быть получен из (4) и табл. 3. Связь между начальным модулем упругости и гидростатическим давлением представлена на рис. 2.

Как видно из рисунка, начальный модуль упругости возрастает с увеличением содержания Na_2SO_4 . Кривые "напряжение-деформация" мерзлых пылеватых песков с одинаковым содержанием соли практически совпадают в начальной упругой стадии, что свидетельствует о том, что давление оказывает лишь незначительное влияние на начальный модуль упругости. В [30] отме-

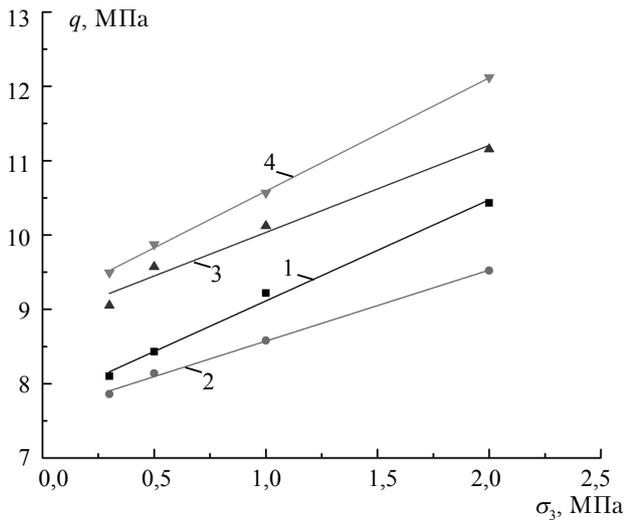


Рис. 3. Расчетные и экспериментальные прочности мерзлых песков от σ_3 при содержании Na_2SO_4 0,0 (1); 0,5 (2); 1,5 (3) и 2,5% (4)

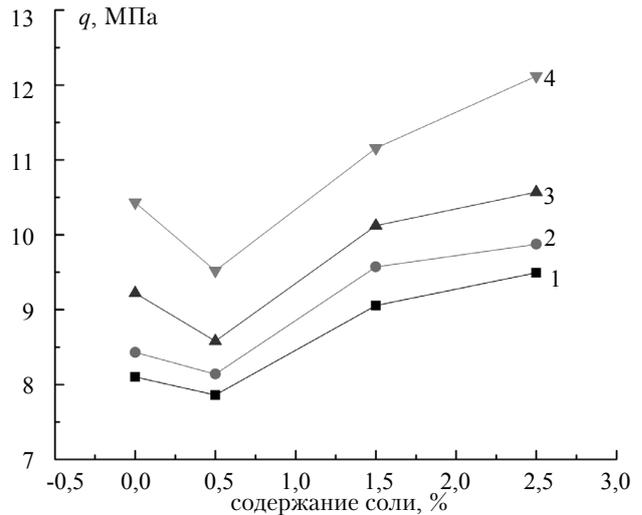


Рис. 4. Зависимость прочности мерзлых песков от содержания соли при $\sigma_3 = 0,3$ (1); 0,5 (2); 1,0 (3) и 2,0 МПа (4)

чено, что на начальный модуль упругости влияет температура и скорость деформации, но нет значимой корреляции с гидростатическим давлением.

На рис. 3 показано, что прочность замороженных пылеватых песков с различным содержанием соли возрастает приблизительно линейно с увеличением гидростатического давления, что аналогично поведению немерзлого грунта [31...35]. При относительно низких давлениях не происходит плавления и дробления частиц, т.е. уменьшения прочности [25...27].

Образцы замороженного пылеватого песка перед трехосными испытаниями включали в себя пустоты, разломы и трещины [5]. В начальной стадии испытаний происходит сжатие образца, что увеличивает силу трения и число контактов между частицами грунта. Всестороннее давление ограничивает радиальное расширение и сдерживает рост трещин в образце.

Для описания соотношения между напряжением и всесторонним давлением используется

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 = M + N\sigma_3, \tag{5}$$

где M и N (МПа) параметры грунта, связанные с содержанием соли (табл. 4).

Связь между прочностью на трехосное сжатие и содержанием Na_2SO_4 представлена на рис. 4. Прочность засоленного мерзлого пылеватого песка уменьшается с увеличением содержания Na_2SO_4 до 0,5%. При большей концентрации Na_2SO_4 прочность возрастает.

Критерий прочности Мора-Кулона

$$\tau = c + \sigma \text{tg} \varphi. \tag{6}$$

Уравнение (6) может быть выражено через главные напряжения

$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi - 2c\sqrt{N_\varphi} = 0, \tag{7}$$

где τ и σ – касательное и нормальное напряжения в плоскости сдвига; N_φ – коэффициент, связанный с углом внутреннего трения

$$N_\varphi = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} = \text{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right). \tag{8}$$

Сопоставляя (5) и (7), получим

$$M = 2c\sqrt{N_\varphi} = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}; \tag{9}$$

$$N = (N\varphi - 1) = \operatorname{tg}^2(45^\circ + \varphi/2) - 1. \quad (10)$$

Таблица 4

Процентное содержание солей	M , МПа	N , МПа	φ , град.	c , МПа
0	7,75234	1,36069	23,88387	2,5228
0,5	7,61728	0,95549	18,8622	2,72359
1,5	8,86283	1,17157	21,67846	3,00715
2,5	9,06488	1,52518	25,63605	2,85224

Сцепление и угол трения могут быть получены из (9) и (10). Результаты представлены в табл. 4.

Связь между сцеплением, углом внутреннего трения и содержанием соли представлена на рис. 5, из которого следует, что сцепление возрастает с увеличением содержания соли до 1,5% и уменьшается с дальнейшим ростом концентрации соли; φ уменьшается с ростом содержания соли до 0,5% и увеличивается при его дальнейшем росте.

В процессе охлаждения часть воды в образце начинает замерзать. При этом увеличивается концентрация солей в поровом растворе, и начинается их кристаллизация, когда раствор становится перенасыщенным. В таком растворе кристаллизация соли может происходить и при положительной температуре [36]. Если же в мерзлом грунте содержание Na_2SO_4 в растворе находится в диапазоне 0...0,5%, кристаллизации не происходит, присутствуют только кристаллы льда. По мере понижения температуры концентрация соли в незамерзшей воде постепенно возрастает, вызывая увеличение содержания незамерзшей воды в грунте. Сцепление грунта при этом возрастает примерно на 0,2 МПа, а угол внутреннего трения уменьшается примерно на 5° , т.е. прочность исследуемого замороженного пылеватого песка снижается с увеличением содержания соли в диапазоне 0...0,5%.

При содержании сульфата натрия в растворе более 0,5% температура замерзания исследуемых песков довольно постоянна [19, 36], поскольку раствор достигает перенасыщенного состояния, и кристаллы соли появляются раньше, чем кристаллы льда. При выпадении кристаллов молекула сульфата натрия поглощает десять молекул воды в виде $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, снижая содержание незамерзшей воды. Зарождающиеся кристаллы льда постепенно заполняют поры, увеличивая плотность и играя роль скелета в мерзлом грунте [37]. В результате, прочность возрастает. При содержании соли от 0,5 до 2,5% связность грунта возрастает и затем уменьшается с увеличением содержания соли. Угол внутреннего трения увеличивается примерно на 7° . Прочность увеличивается медленнее, если содержание соли составляет 1,5...2,5%. В исследованиях содержание воды составило 13%. В связи с ограниченным количеством свободной воды, рост содержания соли приводит к увеличению концентрации порового раствора.

Выводы

Результаты трехосных испытаний засоленных мерзлых пылеватопесчаных грунтов показали:

1. Деформации засоленных мерзлых пылеватопесчаных грунтов при любом всестороннем давлении проходят три этапа: линейно-упругую стадию, упрочнение и разупрочнение. Модифицированная гиперболическая модель Дункан-Чанга может достаточно точно описывать напряженно-деформированное поведение засоленных мерзлых пылеватопесчаных грунтов.
2. На начальной стадии модуль упругости нелинейно увеличивается с ростом концентрации соли. Гидростатическое давление оказывает незначительное влияние на начальный модуль упругости.
3. Уплотнение и ограничение радиальных деформаций грунта при гидростатическом сжатии вызывают увеличение прочности, которая линейно возрастает с повышением всестороннего давления.
4. С увеличением содержания Na_2SO_4 , прочность засоленных мерзлых грунтов вначале уменьшается, а затем возрастает, достигая минимума при содержании сульфата натрия 0,5%.

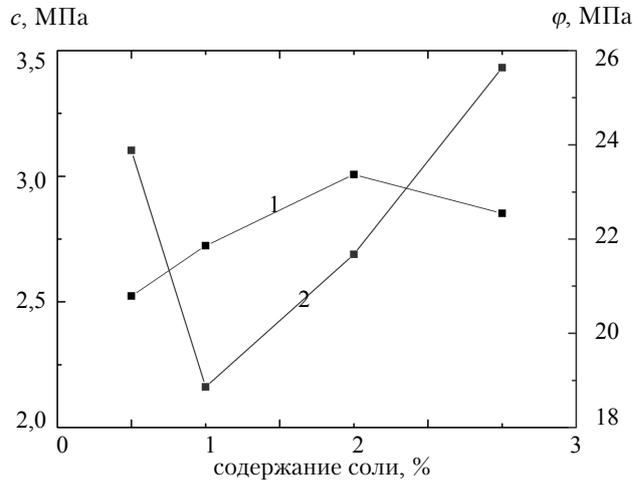


Рис. 5. Взаимосвязь между параметрами прочности и содержанием соли:
1 - сцепление; 2 - угол внутреннего трения

5. Содержание сульфата натрия оказывает существенное влияние как на сцепление, так и на угол внутреннего трения. Сцепление сначала возрастает, а затем уменьшается, достигая максимального значения при концентрации соли 1,5%. Максимальный диапазон изменения составляет 0,25 МПа. Напротив, угол внутреннего трения, также, как и прочность в целом, сначала уменьшается, а затем возрастает с увеличением содержания сульфата натрия, достигая минимума при содержании соли 0,5%. Максимальный диапазон изменения ϕ составляет 7°.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bragg R.A. and Andersland O.B. Strain rate, temperature, and sample size effects on compression and tensile properties of frozen sand, *Eng. Geol.* - 1981. - № 18. - Pp. 35-46.
2. Goughnour R.R. and Andersland O.B. Mechanical properties of a sand-ice system // *Am. Soc. Civil Eng. J. Soil. Mech.* - 1968.
3. Andersland O.B. and Ainouri I. Time-dependent strength behavior of frozen soils // *Journal of the Soil mechanics and Foundation Division.* - 1970/ - № 96(SM4. - Pp. 1249-1265.
4. Zhu Y.L., Zhang J.Y. and Peng W.W. Constitutive relations of frozen soil in uniaxial compression // *J. Glaciol. Geocryol.* - 1992. - № 34. - Pp. 657-663.
5. Ma W., Wu Z.W., Chang X.X. and Wang J. Analysis of microstructural changes in frozen sandy soil under confining pressures using scanning electronic microscope // *J. Glaciol. Geocryol.* - 1995. - № 17. - Pp. 152-158.
6. Li H.P., Zhu Y.L., Zhang J.B. and Lin C. Effects of temperature, strain rate and dry density on compressive strength of saturated frozen clay // *Cold Regions Sci. Technol.* - 2004. - № 39. - Pp. 39-45.
7. Wang D.Y., Ma W., Chang X.X. and Wang A. Study on the resistance to deformation of artificially frozen soil in deep alluvium // *Cold Regions Sci. Technol.* - 2005. - № 42. - Pp. 194-200.
8. Tang G.Z. and Wang X.H. Effect of temperature control on a tunnel in permafrost // *Tunnelling Undergr. Space Technol.* - № 22. - Pp. 483-488.
9. Qi J.L. and Ma W. A new criterion for strength of frozen sand under quick triaxial compression considering effect of confining pressure // *Acta Geotechnica.* - 2007. - № 2. - Pp. 221-226.
10. Lai Y.M., Li S.Y., Qi J.L., Gao Z.H. and Chang X. Strength distributions of warm frozen clay and its stochastic damage constitutive model // *Cold Regions Sci. Technol.* - 2008. - № 53. - Pp. 200-215.
11. Shoop S., Affleck R., Haehnel R. and Janoo V. Mechanical behavior modeling of thaw-weakened soil // *Cold Regions Sci. Technol.* - 2008. - № 52. - Pp. 191-206.
12. Ogata N., Yasuda M. and Kataoka T. Effects of salt concentration on strength and creep behavior of artificially frozen soils // *Cold Regions Sci. Technol.* - 1983. - № 8. - Pp. 139-153.
13. Pharr G.M. and Godavarti P.S. A comparison of the creep behavior of saline ice and frozen saline Ottawa sand at -8°C // *Cold Regions Sci. Technol.* - № 14. - Pp. 273-279.
14. Brouchkov A. Frozen saline soil of the Arctic coast: their distribution and engineering properties // *Proceedings of the Eighth International Conference on Permafrost, Zurich, Switzerland, 7.* - 2003. - Pp. 95-100.
15. Bing H. and He P. Influence of free-thaw cycles on physical and mechanical properties of salty soil // *J. Geotech. Eng.* - 1958-1962 (2009). - № 31.
16. Wang C.L., Xie Q., Jiang C.X. and Hu Q. Analysis of thermal characteristics and mechanical properties of salty soil in frozen area of Qinghai-Tibet railway // *Rock and Soil Mechanics.* - 2009. - № 30. - Pp. 836-839.
17. Nixon J.F. and Lem G. Creep and strength testing of frozen saline fine-grained soils // *Can. Geotech. J.*, 21. - 1984. - Pp. 518-529.
18. Hivon E.G. and Sego D.C. Strength of frozen saline soils // *Can. Geotech. J.* - 1995. № 32. - Pp. 336-354.
19. Bing H. and Ma W. Experimental study of freezing point of saline soil // *J. Glaciol. Geocryol.* - 2011. - № 33. - Pp. 1106-1113.
20. Deng Y.S., Pu Y.B. and Zhou C.L. Experimental study of structure change of saline soils due to freezing // *J. Glaciol. Geocryol.* - 2008. - № 30. - Pp. 632-640.
21. Yang C.S., He P., Cheng G.D. and Bing H. Uniaxial compressive strength of frozen saline silty clay // *Eng. Mech.* - 2006. - № 23. - Pp. 144-148.
22. Yang C.S., He P., Cheng G.D., Zhao S. and Deng Y.S. Study of stress-strain relationships and strength characteristics of saturated saline frozen silty clay // *Rock and Soil Mechanics.* 2008. - № 29. - Pp. 3282-3286.
23. Chen J., Li D.Q., Bing H. et al. The experimental study on the uniaxial compressive strength of frozen silt with different salt content // *Engineering Mechanics.* - 2013. - № 30. - Pp. 18-23.
24. Chamberlain E., Groves C. and Perham R. The mechanical behavior of frozen earth materials under high pressure triaxial test conditions // *Geotechnique.* - 1972. - № 22. - Pp. 469-483.
25. Fish A.M. Strength of frozen soil under a combined stress state // *Proceedings of the Sixth International Symposium on Ground Freezing, Beijing, China.* - 1991. - № 1. - Pp. 135-145.
26. Ma W., Wu Z.W., Zhang L.X. and Chang X. Analyses of process on the strength decrease in frozen soils under high confining pressures // *Cold Regions Sci. Technol.* - 1999. - № 29. - Pp. 1-7.
27. Parameswaran V.R. and Jones S.J. Triaxial testing of frozen sand // *J. Glaciology.* - 1981. - № 27. - Pp. 147-155.
28. Lai Y.M., Cheng H.B., Gao Z.H., Zhang S. and Chang X. Stress-strain relationships and nonlinear Mohr strength criterion of frozen sand clay // *Rock Mech. Rock Eng.* - 2007. - № 26. - Pp. 1612-1617.
29. Xu X.T., Lai Y.M., Dong Y.H. and Qi J. Laboratory investigation on strength and deformation characteristics of ice-saturated frozen sandy soil // *Cold Regions Sci. Technol.* - 2011. - № 69. - Pp. 98-104.
30. Sun X.L., Wang R., Hu M.J. and Hu J.H. Triaxial strength and deformation properties of frozen silty clay under confining pressure // *Rock and Soil Mechanics.* - 2005. - № 26. - Pp. 1623-1627.
31. Asghari E., Toll D.G. and Haeri S.M. Triaxial behavior of a cemented gravely sand, Tehran alluvium // *Geotech. Geol. Eng.* № 21. - Pp. 1-28 (2003).
32. Mohamedzein E.A. and Aboud M.H. "Compressibility and shear strength of a residual soil," *Geotech. Geol. Eng.* - 2006. - № 24. - Pp. 1385-1401.33. Estabragh A.R. and Javadi A.A. Shear strength behavior of unsatu-

- rated silty soil // In Experimental unsaturated soil mechanics / Springer Berlin Heidelberg. - 2007. - Pp. 153-159.
33. Estabragh A.R. and Javadi A.A. Shear strength behavior of unsaturated silty soil // In Experimental unsaturated soil mechanics / Springer Berlin Heidelberg. - 2007. - Pp. 153-159.
34. De S. and Basudhar P.K. Steady state strength behavior of Yamuna sand // Geotech. Geol. Eng. - 2008. - № 26. - Pp. 237-250.
35. Erzin Y. and Yilmaz I. A case study of crushing resistance of Anatolian sands at lower and higher density // Bull. Eng. Geol. Environ. - 2008. - № 67. - Pp. 71-77.
36. Wan X.S., Lai Y.M. and Wang C. Experimental study on the freezing temperatures of saline silty soils // Permafrost Periglac.Process. - 2015. - № 26. - Pp. 175-187.
37. Liu Z.L., Li H.S. and Zhu Y.L. Damage characteristics and micro-crack damage of frozen soil under uniaxial compression // Journal of Dalian. - 2002. - № 42. - Pp. 223-227.