

文章编号: 1000-7598-(2007)11-2343-05

冻融循环对盐渍土黏聚力影响的试验研究

陈炜韬, 王 鹰, 王明年, 李 姝, 王玉锁

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘 要: 通过室内试验, 测试了冻融循环对不同含盐量和不同含盐类别盐渍土黏聚力的影响规律。从结晶体位置变化、微观结构、盐类性质及未冻结水含量三个方面分析了冻融循环对盐渍土黏聚力的作用机理。研究表明, 在含水率一定的情况下, 无论是向土中加入 Na_2SO_4 , 或者是 CaCl_2 , 经冻融循环后黏聚力都随冻融次数的增加而减小, 且第1次和第2次循环为主要减小阶段; 加入 CaCl_2 后黏聚力的减小程度比加入等量 Na_2SO_4 后小; 冻融循环过程中结晶体析出时位置的变化是土体黏聚力和干密度减小的主要原因; 经 SEM 图片分析, 大孔隙占总孔隙面积的比例随冻融次数的增加而减小; 盐渍土中 CaCl_2 溶液的含盐量对冻融循环中黏聚力的变化有重要影响。

关 键 词: 盐渍土; 冻融循环; 黏聚力; 机理研究; 微观结构

中图分类号: TU 448

文献标识码: A

Testing study on influence of freezing and thawing circulation on saline soil's cohesion

CHEN Wei-tao, WANG Ying, WANG Ming-nian, LI Shu, WANG Yu-suo

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to find the mechanism of the effect of freezing and thawing circulation on the cohesion of saline soil, saline soil samples have been tested in laboratory. By analyzing the variation of the crystalloid location, the microstructure, the salt property and unfreezing water content, the mechanism between freezing and thawing circulation and cohesion is obtained. The research results show that while moisture content is constant, adding either sodium sulfate (Na_2SO_4) or calcium chloride (CaCl_2) to the soil samples, the cohesion reduces with freezing and thawing time increasing. And the primary phases of cohesion reduction are the first and second circulation. The degree of cohesion reduction by adding CaCl_2 is minor than adding Na_2SO_4 . The main reason of the reduction of both cohesion and density is that the variation of the crystalloid location occurs while they separate out during freezing and thawing circulation. From the scanning electron microscope (SEM) graph, it is easy to find out that the proportion of big pores of the samples shrink with freezing and thawing circulation time increasing. The content of CaCl_2 solution in saline soil has an important influence on the cohesion variation in freezing and thawing circulation.

Key words: saline soil; freezing and thawing circulation; cohesion; mechanism research; microstructure

1 前 言

盐渍土是一种特殊土, 为地表 1 m 以内, 易溶盐含量大于 0.5 % 的土。我国盐渍土面积占全世界盐渍土总面积的 3.8 %, 位居第 4 位, 西北地区是我国盐渍土分布最多地区^[1], 该地区早晚温差大的特殊环境对盐渍土强度参数的作用过程相似于冻融循环作用。随着西北地区建设的进行, 对盐渍土在冻融循环下强度参数及土体内物理力学性质变化

规律的研究可为西北盐渍土地区的建设和施工提供理论指导。

迄今为止, 国内外关于冻融作用(反复冻融)下土体内物理力学性质变化的理论和试验方面的研究, 归纳起来主要有以下三个方面:

(1) 关于基本物理性质的研究。中国科学院寒区旱区研究所王家澄等^[2]设计了冻融循环的试验装置, 并对反复冻融下饱和砂土成冰条件的试验研究; 杨成松等^[3]研究了冻融作用下土的结构、含水

率和干重度的变化趋势,并基于水分迁移原理进行了机理分析;Chambelain 等^[4]通过研究发现,细粒土经冻融后土的孔隙比减小,但土的渗透性增强,土的塑性指数增大;Zimmie 等^[5]也指出,经过冻融后土体的渗透性会比开始大 1~2 个数量级;Eigenbrod^[6]认为冻融后土体的体积随冻融循环次数的增加而增大,但逐渐趋于稳定。

(2) 考虑胀缩对工程的影响,对胀缩预报预测模型和定量评价的研究。典型的冻胀预报模型如 Konrad^[7]的分凝式模型;融沉模型如 Nixon 等^[8]的一维边界条件的融沉模型;我国学者袁红等^[9]通过研究建立了冻融后盐渍土盐胀率的数学回归模型。

(3) 基于室内试验进行的力学性质研究,Simonse 等^[10]研究发现,冻融后土的模量会降低 25%~60%。对于强度参数的研究,目前学者 Yong^[11],齐吉林^[12]的研究表明,土经冻融后强度变化有降低、不变、增大三种,主要取决于土的状态和试验条件。

阅读大量的文献后发现,尽管关于土的冻融循环方面的文章较多,但都是针对一般的黏性土和黄土,且未对冻融循环影响土体的强度的机理详尽地分析,对于研究盐渍土在冻融后强度参数的变化方面目前也未见报道。

本次研究在前人已有的成果基础上,通过对盐渍土进行了冻融循环室内试验研究,得到了强度参数黏聚力和内摩擦角随冻融循环次数的变化规律。用扫描电镜对冻融后土体微观结构扫描,利用微观定量分析原理对冻融循环后土体的孔隙特征进行了分析,同时,结合土体中晶体析出位置的变化、土体微观结构以及土体中所含盐的性质,探讨了冻融作用对盐渍土黏聚力的作用机理。

2 试验研究

以格尔木市郊盐渍土为研究对象,土样为氯盐盐渍土,土样的易溶盐成分分析见文献[13]。制备试样时,取土样的最优含水率为 15.56% 和最大干密度为 1.74 g/cm³。设定冰冻温度为 -10℃,每冷冻 24 h 后,立即将样取出让土体温度变为室温,然后再进行剪切试验。试验结果见表 1,表中冻融次数 0 表示制样之后没有冻结后的结果,试验得到的黏聚力 c (kPa) 与冻融循环次数的关系曲线见图 1, 2, 剪切试样的室内温度为 23.5~23.7℃。表 1 以及图 1、图 2 都表明,含水率一定时,无论是向土中加入 Na₂SO₄, 或者是 CaCl₂, 经过冻融循环后黏聚力随着冻融次数的增加而减小,主要减小阶段在第 1, 2 次循环,第 3 次与第 2 次之间减小程度较

小。加入 CaCl₂ 的情况下,每次循环时黏聚力减小最多为 1.12 kPa, 最小为 0 kPa, 加入 Na₂SO₄ 的情况下,每次循环时黏聚力减小最多为 7.43 kPa, 最小为 0.12 kPa。经 3 次循环后,前者黏聚力减小最多为 2.47 kPa, 后者为 14.1 kPa。比较试验数据可知,掺加 CaCl₂ 后黏聚力的减小程度比加入等量 Na₂SO₄ 后要小。

表 1 各次冻融循环后的黏聚力
Table 1 Cohesion of every freezing and thawing circulation

状态	全盐量 $R/\%$	各次冻融后土的黏聚力 c /kPa			
		第 0 次	第 1 次	第 2 次	第 3 次
原土	7.36	27.04	26.02	25.55	25.40
	9.36	19.05	17.93	17.02	16.95
掺加无水 CaCl ₂ 后	12.36	20.94	19.36	19.00	18.91
	15.36	23.08	22.27	21.77	21.61
	17.36	26.08	25.66	24.51	24.51
	9.36	21.18	20.09	18.42	18.30
掺加无水 Na ₂ SO ₄ 后	12.36	28.15	22.22	18.80	17.91
	15.36	33.68	26.25	21.06	20.44
	17.36	34.4	27.40	21.93	20.30
	9.36	21.18	20.09	18.42	18.30

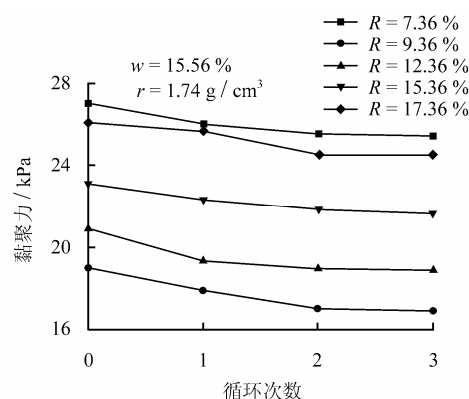


图 1 掺加 CaCl₂ 后土黏聚力与循环次数的关系

Fig.1 Cohesion changing with circulation time while adding Na₂SO₄

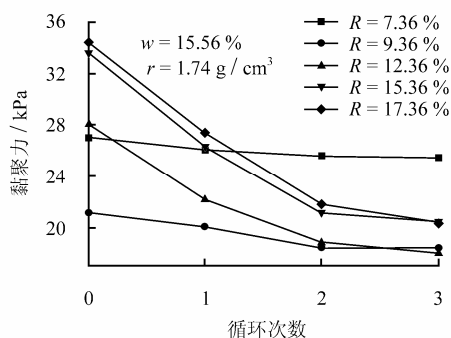


图 2 掺加 Na₂SO₄ 后土黏聚力与循环次数的关系

Fig.2 Cohesion changing with circulation time while adding Na₂SO₄

3 冻融循环对盐渍土黏聚力的影响机理

3.1 冻融循环时结晶体位置变化分析

土体中 CaCl_2 及 Na_2SO_4 在温度改变时将结晶析出或溶解, 在这个过程中土体中颗粒间的相互位置和变形与以前相比有很大不同。温度变化时, 由于土体中含盐水溶液重新分布^[13, 14], 致使在下次降温时在第 1 次冻结过程中析出晶体的地方, 而在第 2 次冻结时不一定有晶体析出。以后的冻结、融解过程中也是这样, 每次盐析出的位置要发生变化。Viklander 等^[15]研究指出, 冻融循环中由于晶体的析出使得密实土和松散土经过若干循环后孔隙比趋于一个稳定值 e_{res} , 如图 3 所示。

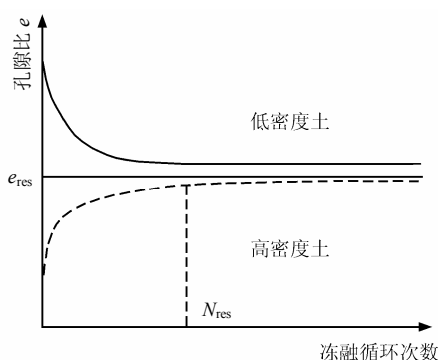


图 3 孔隙比随冻融循环次数的变化曲线

Fig.3 Changing of void ratio with circulation time

每一次冻融循环过程中强度参数减小的机理分析如下：

(1) 第 1 次冻融循环过程后强度参数变化。 CaCl_2 结晶时一般体积不发生变化^[16], 除本身土体中有一部分硫酸盐发生体积膨胀外, CaCl_2 结晶时从溶液析出和水结冰时对周围的土体存在挤压, 在一定程度上影响了密实度。而掺加 Na_2SO_4 后的盐渍土, 除水结冰发生体胀外, Na_2SO_4 本身结晶时生成 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, 也使得土体体积发生膨胀, 增大土粒间距, 使土颗粒发生错动, 密实度减小, 强度下降, 因此加入 Na_2SO_4 时黏聚力减小的程度比掺加 CaCl_2 的大, 且随着掺加 Na_2SO_4 含量的增大而减小更多, 因为 Na_2SO_4 含量越大对密实度的影响就越大。

晶体溶解后, 土颗粒之间失去了支撑形成空缺, 因而此时有部分土颗粒回落到孔隙间。但是, 另一部分土颗粒虽然失去了晶体的支撑, 但还存在其他土颗粒与其的相互作用(如长程力、短程力、内摩阻力、黏结力等), 因此, 这一部分土颗粒并不发生回落现象。

(2) 第 2 次冻融循环过程中土体的盐分的变化情况与第 1 次类似, 只是由于第 2 次冻融结晶时产生的结晶挤压和体积膨胀有一部分消耗在土体经第 1 次循环后形成的孔隙中了, 土体的孔隙比减小程度减缓, 导致了盐分对密实度影响减小。另一方面, 土体中的孔隙越多在升温时土颗粒的回落量就越大, 所以在第 2 次融解后所测得的强度参数减小的程度减小。

(3) 第 3 次冻融循环对强度参数的影响与前两次一样, 只是盐分在结晶时对土体密实度影响进一步减小, 土体在融解后强度参数减小的累计量增大缓慢。因此, 冻融循环中强度参数的减小大部分都发生在前两个循环。

以上的机理解释是基于晶体析出时的位置改变引起孔隙比、密实度变化来阐述的, 这与国内外的一些研究^[12, 15]吻合。

3.2 微观结构分析

对冻融循环后盐渍土微观结构分析采用的扫描装置是日本 S—3 000 N 型扫描电子显微镜, 本文主要列出了原土经 3 次冻融后微观结构进行分析(其他的 SEM 图片具体见文献[18]), 扫描的 SEM 图片见图 4~6。

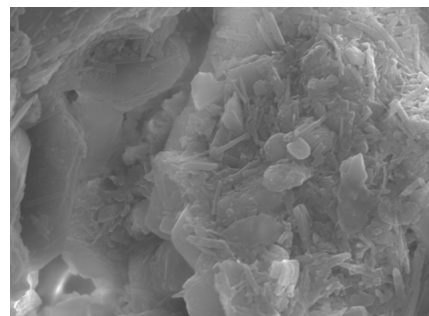


图 4 原土 ($R=7.36\%$) 第 1 次循环后 SEM ($\times 3\,000$ 倍)

Fig.4 SEM of original saline soil after the first circulation ($\times 3\,000$ times)

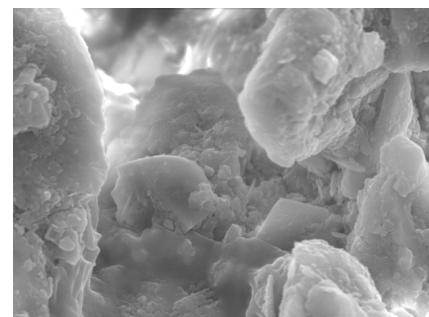


图 5 原土 ($R=7.36\%$) 第 2 次循环后 SEM ($\times 3\,000$ 倍)

Fig.5 SEM of original saline soil after the second circulation ($\times 3\,000$ times)

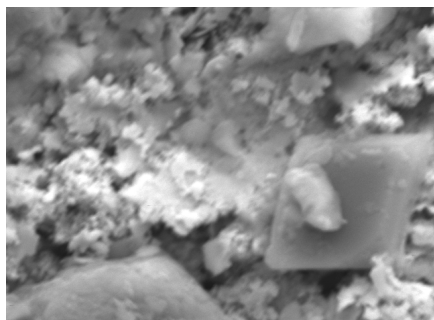


图 6 原土 ($R=7.36\%$) 第 3 次循环后 SEM ($\times 3\,000$ 倍)
Fig.6 SEM of original saline soil after the third circulation
($\times 3\,000$ times)

试样冻融后, 孔隙特征发生了明显的变化, 必然导致土骨架特征发生相应的变化, 使传力骨架的结构体系发生内部位移, 造成结构性的变化。图 4~6 的电镜分析^[18]显示, 第 1 次冻融循环后的 SEM (图 4) 和第 2 次循环后的 SEM (图 4) 的孔隙面积明显增大, 且出现较多的大孔隙, 且能清晰地看到盐结晶的晶体, 而第 3 次冻融循环之后的 SEM 图 6 分析发现大孔隙反而减少, 粒间孔隙增多, 但是总的孔隙面积并没有减少。

黏聚力主要来源于自由分子力、结构的颗粒间胶结力及结构颗粒间的咬合等的共同作用。由于分子力主要取决于矿物成分和密度, 孔隙的增多必然导致土体的密实度降低, 自然黏聚力就降低, 同时土结构的冻融破坏使得胶结力减小, 更使得黏聚力的降低势在必行。

3.3 盐类性质及土体中未冻结水分析

根据研究^[19, 20], 氯盐类溶解于水后能使溶液的冰点降低, 具体见表 2。含水率一定时, 随着 CaCl_2 的掺入, 土体中 CaCl_2 的浓度增大, 土体的冰点下降, 这样不仅减小了本身结晶对密实度的影响, 而且减小了水冻胀的影响, 同时根据《铁路工程地质经验汇编》中指出, Na_2SO_4 的溶解度随 CaCl_2 在溶液中浓度的增大呈减小趋势, 从而使得 Na_2SO_4 结晶体胀的减小。图 2 中掺加 Na_2SO_4 后全盐量 R 为 9.36 % 和 12.36 % 时, 其黏聚力曲线较缓就是在于此, 随着掺加 Na_2SO_4 的增多, CaCl_2 的抑制作用减弱, 曲线变陡, 同样也是图 1 中掺加 CaCl_2 后全盐量 R 为 9.36 % 和 12.36 % 时, 其黏聚力曲线较陡的原因之一。

当在冻结时, 土体中未冻结水含量越少土体的冻结程度就好, 因此, 当含水率一定时, 土体中未冻结水等于 0 时, 土体的冻胀就最大。含盐土体在冻结时, 土体中含盐溶液浓度大的未冻结水含量越

小^[20], 因此, 试验得到含盐量大的盐渍土在冻融中表现为第 1, 2 次循环后曲线斜率大。但是, 对于含较大初始浓度的硫酸钠盐渍土在温度降低过程中, 将析出较多的 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 从而占用较多的水分, 使试样中含水率减少, 并进一步影响到未冻水含量, 使未冻水含量也减小; 而在土体的第 1 相态变化中, CaCl_2 结晶时不形成结合水。因此, 同浓度、同含水率、同冻结温度下, 含氯盐盐渍土中的未冻结水高于含硫酸盐盐渍土, 即前者的冻胀小于后者。故除全盐量 $R=7.36\%$ 对应的曲线外, 图 2 中曲线比图 1 中曲线在第 1, 2 次循环后黏聚力曲线更陡。

表 2 溶液浓度与冰点变化关系
Table 2 Corresponding relation between solution consistency and freezing point

盐类	浓度/%			
	5	10	15	20
NaCl	-3.1	-6.9	-11.8	-17.8
CaCl ₂	-2.5	-5.9	-10.4	-17.4

4 结 论

(1) 含水率一定情况下, 无论是向土中加入 Na_2SO_4 或者是 CaCl_2 , 冻融循环后黏聚力随着冻融次数的增加而减小, 且主要减小阶段在第 1 次和第 2 次循环, 黏聚力的减小趋势也随着冻融次数的增加而相对的平缓。

(2) 反复冻融时盐渍土中的水分、易溶盐盐分有结晶—融化—结晶过程的变化, 晶体析出位置的变化增大了土体的孔隙比, 影响了土体的密实度, 进而盐渍土的黏聚力随冻融循环次数的增加而减小, 但是当冻融次数达到一定时孔隙比变化较小, 故黏聚力在第 2 次与第 3 次间变化不大。

(3) 电镜分析表明, 在第 1 次和第 2 次冻融后土体出现大孔隙, 第 3 次冻融后大孔隙减少而粒间孔隙增多, 但总的孔隙面积并没有减少。

(4) 土体中氯盐溶液降低土体冻结冰点时, 随着掺加 Na_2SO_4 的增多, CaCl_2 的抑制作用减弱, 因此, 土体中氯盐的浓度在冻融循环过程中对土体的黏聚力影响较大。

(5) 在第 1 相态过程中, 同浓度、同含水率、同冻结温度下, 含氯盐盐渍土中的未冻结水高于含硫酸盐盐渍土, 即前者的冻胀小于后者。

参 考 文 献

- [1] 王小生, 章洪庆, 薛明, 等. 盐渍土地区道路病害与防治[J]. 同济大学学报, 2003, 31(10): 1 178—1 182.

- WANG Xiao-sheng, ZHANG Hong-qing, XUE Ming, et al. Road disease and treatment in saline soil area[J]. **Journal of Tongji University**, 2003, 31(10): 1178—1182.
- [2] 王家澄, 程国栋, 张宏鼎, 等. 饱水砂土冻融时成冰条件的试验研究[J]. 冰川冻土, 1992, 14(2): 101—105.
WANG Jia-cheng, CHENG Guo-dong, ZHANG Jia-ding. Testing study on becoming ice condition of saturation sand soil in freezing[J]. **Journal of Glaciology and Geocryology**, 1992, 14(2): 101—105.
- [3] 杨成松, 何平, 朱元林, 等. 冻融作用对土体干重度何含水率影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22: 2695—2699.
YANG Cheng-song, HE Ping, ZHU Yuan-lin, et al. Testing study on influence of freezing and thawing on dry density on water content of soil[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22: 2695—2699.
- [4] Chamberlain Edwin J, Gow Anthony J. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils[J]. **Engineering Geology**, 1979, 13: 73—92.
- [5] Zimmie T F, LaPlante C. The effect of freeze-thaw cycles on the permeability of a fine-grained soil[A]. **Proceedings of 22nd Mid-Atlantic Industrial Waste Conference**[C]. [s. l.]: Drexel University, 1990: 580—593.
- [6] Eigenbrod K D. Effects of cyclic freezing and thawing on volume changes and permeabilities of soft fine-grained soils[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1996, 33 (4): 529—537.
- [7] Konrad J M, Morgenstern N R. Mechanistic theory of ice lens formation in fine-grained soils[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1980, 17(4): 473—486.
- [8] Nixon J F, Ladanyi B. Thaw consolidation[A]. **Geotechnical Engineering for Cold Regions(chapter4)** [C]. Andersland O B, Anderson M, eds. New York: McGraw-Hill, 1978.
- [9] 袁红, 李斌. 硫酸盐渍土起胀含盐量及容许含盐量的研究[J]. 中国公路学报, 1995, 8(3): 10—14.
YUAN Hong, LI Bin. On the minimum salt content and allowable salt content of sulphate salty soil[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 1995, 8(3): 10—14.
- [10] Sinonsen Erik, Janoo Vincent C, Isacsson Ulf. Resilient properties of unbound road materials during seasonal frost conditions[J]. **Journal of Cold Regions Engineering**, 2002, 16 (1): 28—50.
- [11] Yong R N, Boonsinsuk P, Yin C W P. Alternation of soil behavior after cyclic freezing and thawing[A]. **Proceedings of 4th International Symposium on Ground Freezing**[C]. Rotterdam, the Netherlands: AA Balkema, 1985.
- [12] 齐吉琳, 张建明, 朱元林. 冻融作用对土结构性影响的土力学意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22: 2690—2694.
QI Ji-ling, ZHANG Jian-ming, ZHU Yuan-lin. Influence of freezing-thawing on soil structure and its soil mechanics significance[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, (22): 2690—2694.
- [13] 陈炜韬, 王明年, 王鹰, 等. 含盐量及含水率对氯盐盐渍土抗剪强度参数的影响[J]. 中国铁道科学, 2006, (4): 1—5.
CHEN Wei-tao, WANG Ming-nian, WANG Ying, et al. Influence of salt content and water content on chlorine saline soil's shearing strength parameters[J]. **China Railway Science**, 2006, (4): 1—5.
- [14] YANG Cheng song, HE Ping, CHENG Guodong, et al. Freeze thaw experiment influence on moisture content distrution of soil[J]. **Journal of Glaciology and Geocryology**, 2004, (26): 50—55.
- [15] 徐学祖, 邓友生. 冻土中水分迁移的试验研究[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [16] Viklander Peter. Permeability and volume changes in till due to cyclic freeze/thaw[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1998, 35(3): 471—477.
- [17] 王鹰, 谢强, 赵小兵. 含盐地层工程性能及其对铁路工程的影响[J]. 矿物岩石, 2000, 31(10): 81—85.
WANG Ying, XIE Qiang. Engineering properties of salt-bearing strata and its effects on construction of railway[J]. **Journal of Mineralogy and Petrology**, 2000, 31(10): 81—85.
- [18] 马巍, 徐学祖, 张立新. 冻融循环对石灰粉土剪切强度特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(2): 158—160.
MA Wei, XU Xue-zu, ZHANG Li-xin. Influence of frost and thaw cycles on shear strength of lime silt[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(2): 158—160.
- [19] 陈炜韬. 环境因素变化对格尔木地区盐渍土抗剪强度参数的影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2005.
- [20] 铁道部第一勘测设计院. 盐渍土地区铁路工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1988.
- [21] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.