

DOI: 10.11779/CJGE2020S2012

NaCl 含量对伊犁原状黄土湿陷和溶陷特性的影响

牛丽思, 张爱军*, 王毓国, 韩婧文, 赵佳敏, 胡锦方

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 基于对易溶盐溶解是发生溶陷变形根本原因的认识, 对黄土湿陷试验进行扩展, 开展了不同 NaCl 含量的伊犁原状黄土样的原含水率、浸纯水和浸饱和 NaCl 溶液三种黄土压缩试验, 实现了湿陷和溶陷的区分, 探究了 NaCl 含量对压缩、湿陷和溶陷特性的影响规律。研究结果表明: 通过以上三种试验能很好地区分湿陷和溶陷, 当 NaCl 含量较小时, 湿陷作用较大, 随 NaCl 含量的增加, 影响变形的主导作用由湿陷作用逐渐转向溶陷作用, 当 NaCl 含量为 10 g/kg 左右时两种作用基本相等; 随 NaCl 含量的增加, 峰值溶陷系数呈幂函数增加, 峰值湿陷系数呈线性减小, 起始溶陷压力呈指数降低; 施加垂直压力后, 试样高度呈先陡后缓的减小趋势, 变形稳定时间随垂直压力的增大而增长。

关键词: 伊犁黄土; NaCl 含量; 湿陷; 溶陷; 变形

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)S2-0067-05

作者简介: 牛丽思(1990—), 女, 博士研究生, 主要从事非饱和黄土试验研究工作。E-mail: lisi_niu@sohu.com。

Effects of NaCl content on water collapsibility and salt collapsibility of undisturbed Ili loess

NIU Li-si, ZHANG Ai-jun, WANG Yu-guo, HAN Jing-wen, ZHAO Jia-min, HU Jin-fang

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Based on the understanding that the dissolution of soluble salt is the root cause of salt collapsible deformation, three kinds of loess compression tests are carried out on undisturbed Ili loess samples with different NaCl contents, namely, original water content, soaked in pure water and saturated NaCl solution, which is an extension of loess collapsibility test. The difference between water collapse and salt collapse is achieved, and the influences of NaCl content on the characteristics of compression, water collapsibility and salt collapsibility are investigated. The results show that the above three kinds of tests can well distinguish the water collapse and salt collapse. When the NaCl content is small, the water collapse is greater, and with the increase of NaCl content, the leading role of deformation is gradually changed from the water effect to the salt effect. When the NaCl content is about 10 g/kg, the two effects are almost equal. With the increase of NaCl content, the peak salt collapse coefficient increases as a power function, while the peak water collapse coefficient decreases linearly and the starting pressure of salt collapse decreases exponentially. When the vertical pressure is applied, the height of the sample decreases from steeply to slowly, the time of deformation stabilization increases with the increase of vertical pressure.

Key words: Ili loess; NaCl content; water collapse; salt collapse; deformation

0 引言

伊犁河谷位于我国新疆西北部, 因常年受大西洋气候的影响, 使其河流两侧的西风区黄土表现出异于季风区黄土高原黄土的特殊性, 该地区黄土的现场观测最大自重湿陷量为 3.52 m, 室内测定易溶盐总量可达 19.2 g/kg^[1]。伊犁黄土湿陷性强烈、易溶盐含量极高, 其遇水增湿变形实质上是湿陷和溶陷共同作用的结果, 但目前针对湿陷和溶陷的区分及其对总变形的影响规律研究鲜有报道。

波波夫(1957)认为当含盐量较低时, 黄土中的

易溶盐处于微结晶状态, 附着于土颗粒表面, 起胶结作用, 浸水后结晶盐溶解, 胶结消失, 发生湿陷。此外, 易溶盐会引起土颗粒之间液体浓度的较大变化, 影响土颗粒表面吸附薄膜水的厚度, 改变黄土颗粒之间的胶结从而影响黄土的湿陷性。大量试验证明黄土中盐分的存在对胶结土体颗粒、维持黄土结构起到重

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0405103); 国家自然科学基金面上项目(51978572); 陕西省重点研发计划项目(2017ZDXM-SF-074); 陕西省水利科技计划项目(2013slkj-10)

收稿日期: 2020-08-07

*通信作者(E-mail: zaj@nwsuaf.edu.cn)

要的作用，在黄土的湿陷过程中盐分发挥的作用不容忽视^[2-5]。

盐渍土的溶除了与反映土的密实程度与结构形式的原始结构状态相关外，还受盐分性质、含盐量（尤其是易溶盐含量）的影响。有学者表明土粒连接点处结晶盐的溶解是产生溶陷变形的根本原因^[6]，可以说如果没有结晶盐的溶解，就没有溶陷特性可言。在盐渍土溶陷特性的研究方面，杨晓华等^[7]得出影响盐渍土溶陷性质的主要因素是氯化物的结论；宋通海^[8]指出在较小压力下，氯盐渍土含盐量较小的试样，其溶陷系数较大，当压力增加到一定值时，溶陷系数随含盐量的增加而增大；杨晓华等^[7]采用离心模型试验对氯盐渍土进行室内潜蚀溶陷变形的模拟，表明氯盐渍土的最大溶陷系数随Cl⁻增加先增大后减小，但温度对溶陷特性影响甚微。梁维云等^[9]结合微观孔隙结构分析了不同浓度NaCl溶液对重塑膨胀土压缩性的影响。

以上研究都得出了有益的规律性结论，但将黄土湿陷性和盐渍土溶陷性独立来研究的居多，且存在用重塑试样试验和盐分含量低、跨度小的问题，针对黄土中湿陷和溶陷的区分以及两者共同作用下的研究未见报道。针对以上不足，本文以新疆伊犁原状黄土为研究对象，开展不同NaCl含量的原状黄土的保持含水率不变的黄土压缩试验、浸纯水黄土压缩试验和浸饱和NaCl溶液黄土压缩试验3种试验，提出湿陷与溶陷的区分方法，并揭示NaCl含量对伊犁黄土湿陷特性和溶陷性的影响机制及规律。

1 试验材料和试验方法

1.1 试验材料

试验土样取自新疆伊犁特克斯河左岸的IV级阶地上，取土深度为地表以下20.5~21.0 m，土样为质地均匀、有大孔隙的Q₃原生黄土。室内试验测得土样的土粒相对密度为2.72，初始含水率为4.16%，初始干密度为1.43 g/cm³，液限为29.2%，塑限为19.0%，属于低液限黏土(CL)。试验所用盐溶液采用NaCl分析纯配制，溶剂为无气蒸馏水，配制盐溶液时控制环境温度为25℃。

1.2 试样制备

本试验中不同NaCl含量的原状伊犁黄土试样是采用滴加NaCl溶液的水膜转移法制备获得。土样含水率为12%，NaCl含量分别为5, 8, 14, 20, 26 g/kg。

具体操作如下：①采用环刀法制备50 cm²×2 cm的原状试样，同组含盐试样的密度差应小于0.03 g/cm³，在试样底部放置半透膜以防后续盐分流失；②

根据设计NaCl含量，采用胶头滴管进行少量、缓慢、分次地滴加盐溶液，每次滴盐后应放置通风阴凉处24 h以上；③试样滴加至设计NaCl含量后，对较高、较低含水试样分别采用风干、滴水的方式达到设计含水率，随后用保鲜膜密封后放置保湿缸中养护72 h以上，使水、盐充分扩散均匀。

1.3 试验方法

试验设备采用南京土壤仪器厂研制的全自动气压固结仪，对NaCl含量为5, 8, 14, 20, 26 g/kg的5组试样开展试验。试验中借鉴土工试验规程(SL237—2018)中双线法湿陷试验的原理，对每组NaCl含量试样均进行三个试验：①含水率不变下的黄土压缩试验(简称压缩试验)；②在50 kPa垂直压力稳定后的浸纯水压缩试验(简称浸水试验)；③在50 kPa垂直压力稳定后的浸饱和NaCl溶液压缩试验(简称浸盐试验)。

试验中，浸水试验期间不断换水，以保证试样内盐分完全溶解。垂直压力施加等级为50, 100, 200, 400, 800, 1200, 1600 kPa，每级压力稳定标准为连续2 h变形量不大于0.01 mm/h。

1.4 试验原理

溶陷变形是由于土颗粒间的结晶盐溶解所致。认为浸饱和NaCl溶液试样时NaCl晶体不再溶解，所测变形量只有湿陷量；而浸纯水试样时所测变形量为湿陷量和溶陷量之和。因此，同级压力下的浸盐与压缩试验的变形量之差为湿陷量，浸水与浸盐试验的变形量之差为溶陷量。采用原含水率压缩、浸水和浸盐试验就可测出试样的湿陷量和溶陷量，实现对试样湿陷和溶陷的区分。本文提出的试验方法实质上是对黄土湿陷试验的扩展，可分为双线法和单线法两种，本次采用双线法进行。

2 湿陷特性和溶陷特性分析

2.1 变形系数与垂直压力的关系

相同NaCl含量下，某级垂直压力下的压缩试验、浸盐试验和浸水试验的变形量分别用h₁、h₂、h₃表示，如上文所述，浸盐试验和压缩试验的变形量之差为湿陷量，即h_s=h₂-h₁，浸水试验与浸盐试验的变形量之差为溶陷量，即h_r=h₃-h₂，湿陷量和溶陷量之和称为总变形量，即h=h_s+h_r=h₃-h₁；基于土工试验规程中对湿陷系数的定义，本文将试样各级垂直压力下的总变形量、湿陷量和溶陷量与试样初始高度h₀之比分别称为变形系数δ、湿陷系数δ_s和溶陷系数δ_r。

图1为相同NaCl含量下的变形系数δ、溶陷系数δ_r、湿陷系数δ_s和垂直压力p的关系曲线，以含盐量为5, 8, 14 g/kg为例。从图中可见：

(1) NaCl 含量一定时, δ , δ_s , δ_r 均随垂直压力 p 的增加而增大, 当垂直压力达到一定值时, 系数 δ , δ_s , δ_r 出现最大值, 即试样达到最大变形量, 不同条件下试样的最大变形量均出现在垂直压力 p 等于 400 kPa 时, 此垂直压力称为峰值垂直压力, 所对应的系数称为峰值系数。

(2) 在垂直压力 p 超过 400 kPa 之后, 随垂直压力的增加系数 δ , δ_s , δ_r 开始减小并逐渐趋于稳定, 在垂直压力超出 800 kPa 之后, 不同条件下的曲线基本达到稳定; 当 NaCl 含量为 5 g/kg 时, 试样在垂直压力 800 kPa 之后的溶陷系数 δ_r 近似为 0, 此时溶陷现象基本消失; 这是由于随垂直压力的逐渐增大, 土颗粒间大孔隙慢慢被细粒填充, 试样内易溶盐的可溶解量及孔隙比减小量受限所致。

(3) 随着 NaCl 含量的增加, 溶陷系数 δ_r 曲线逐渐上移, 湿陷系数 δ_s 曲线相对下移, 表明溶陷作用增强、湿陷作用相对减弱。当 NaCl 含量在 8~14 g/kg 范围内, 存在溶陷作用与湿陷作用相持状态的临界 NaCl 含量, 该 NaCl 含量是判定试样产生变形由湿陷还是溶陷起主导作用的分界线。

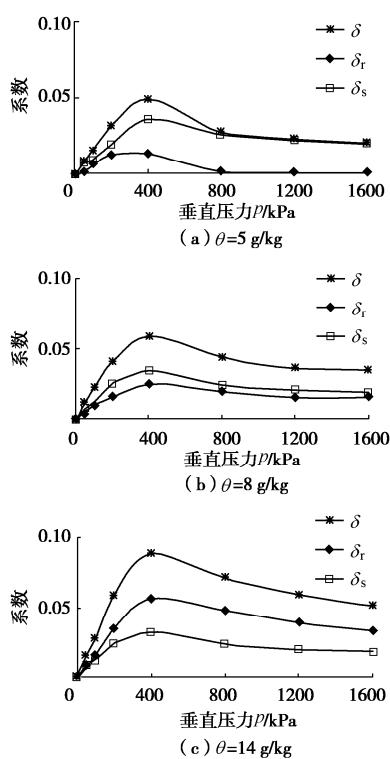


图 1 相同 NaCl 含量下 δ , δ_s , δ_r 和 p 的关系曲线

Fig. 1 Relationship among δ , δ_s , δ_r and p under same NaCl content

图 2 为不同 NaCl 含量下的变形系数 δ 、溶陷系数 δ_r 、湿陷系数 δ_s 和垂直压力 p 的关系曲线。从图 2 中可见, 变形系数 δ 曲线和溶陷系数 δ_r 曲线均随 NaCl 含量的增加逐渐上移, 且在 NaCl 含量 8~14 g/kg 范围内增幅最大。湿陷系数 δ_s 曲线随 NaCl 含量的增加

逐渐下移, 在 NaCl 含量 20~26 g/kg 范围内降幅最大, 这主要是由于压缩试样在高 NaCl 含量下变形量增大的缘故。表明随 NaCl 含量的增加, 盐分溶解所引起的溶陷作用逐渐增强, 湿陷作用相对减弱, 试样变形的主导因素由湿陷作用逐渐转向溶陷作用。

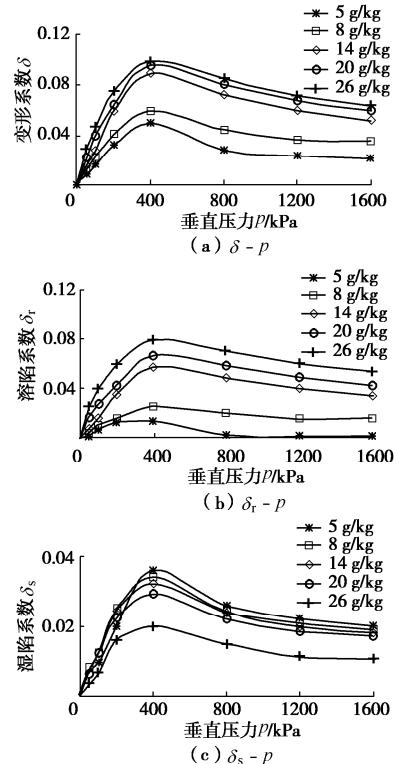


图 2 不同 NaCl 含量下 δ , δ_s , δ_r 和 p 的关系曲线

Fig. 2 Relationship among δ , δ_s , δ_r and p under different NaCl contents

2.2 峰值系数、起始压力与 NaCl 含量的关系

由图 2 可知, 不同条件下曲线的峰值垂直压力均为 400 kPa, 所对应的为峰值系数与 NaCl 含量的关系见图 3 (a) 所示, 其中 δ_f , δ_{rf} , δ_{sf} 分别为峰值变形系数、峰值溶陷系数、峰值湿陷系数。可见: 相同 NaCl 含量下, 峰值变形系数始终最大; 随 NaCl 含量的增加, δ_f 与 δ_{rf} 均近似呈幂函数增加, δ_{sf} 呈线性减小。试样的变形是溶陷和湿陷共同作用的结果, 由于湿陷作用小幅度减弱, 使得峰值变形系数曲线略缓于峰值溶陷系数曲线, 即前者随 NaCl 含量的变化率较小, 但两者整体变化规律仍一致。

试样的总变形是溶陷变形和湿陷变形之和, 用 δ_{rf}/δ_f , δ_{sf}/δ_f 分别表示溶陷变形、湿陷变形占总变形的百分比, 其与 NaCl 含量的关系见图 3 (b) 所示。可见, 在 NaCl 含量 10 g/kg 左右两条曲线相交, 此时湿陷作用和溶陷作用对总变形的贡献率相等, 两者各占总变形的 50 %, 该点为湿陷作用和溶陷作用对试样变形特性起主导作用的分界点。随含盐量的增加, δ_{sf}/δ_f 和 δ_{rf}/δ_f 呈现出此消彼长的变化规律, 即湿陷作用相对

减弱、溶陷作用相对增强，在NaCl含量超出10 g/kg后，溶陷作用强于湿陷作用，此时因盐分引起的溶陷特性不容忽视。

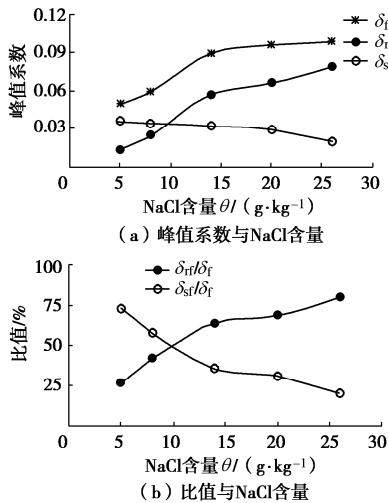


图3 峰值系数及其比值与NaCl含量的关系曲线

Fig. 3 Relationship among peak coefficient, ratio and NaCl content

本文将传统意义上的“湿陷变形”分为由盐分溶解引起的溶陷变形和水侵蚀作用引起的湿陷变形两个部分，为加以区分，将两者之和称为总变形，即文中的变形系数实质为传统意义上的“湿陷系数”。结合规范中提出“湿陷系数为0.015时所对应的压力为湿陷起始压力”的规定，以及溶陷系数为0.01时所对应的压力为溶陷起始压力^[8]。本文认为变形系数、溶陷系数、湿陷系数分别在起始变形为0.015, 0.01, 0.01时所对应的压力为变形起始压力、溶陷起始压力、湿陷起始压力，依次表示为 p_s 、 p_{s1} 、 p_{s2} 。

从图2中的 δ 、 δ_r 、 δ_s 和 p 的关系曲线上确定出相应的起始压力值，不同起始压力与NaCl含量的关系见图4所示。可见，随NaCl含量的增加，变形起始压力 p_s 逐渐增加，溶陷起始压力 p_{s1} 逐渐减小，两者都随NaCl含量近似呈指数关系变化，而湿陷起始压力 p_{s2} 随NaCl含量的增大表现为先减小后增大趋势；在NaCl含量为8~14 g/kg间，湿陷起始压力存在最小值，表明较小的压力就能使试样开始出现湿陷变形，此时湿陷作用引起试样的变形敏感性最强。

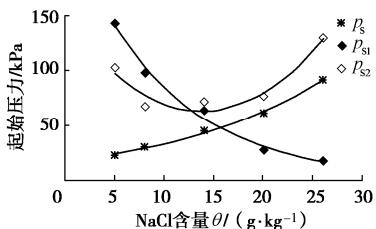


图4 起始压力随NaCl含量的变化曲线

Fig. 4 Curves of starting pressure with NaCl content

2.3 不同条件下试样高度时程曲线

图5为不同试验在各级垂直压力下试样高度的时程曲线，以NaCl含量14 g/kg为例，连接各级垂直压力下的稳定值得到试样高度变化曲线。从图5可见：

(1) 不同试验的试样高度随时间的增加逐渐降低，在垂直压力超过800 kPa以后，试样高度降低速率逐渐变小。试验结束后浸水试样高度最小，浸盐试样其次，压缩试样最大，即试验结束后试样的变形量由大到小依次为浸水试验、浸盐试验、压缩试验。

(2) 每级垂直压力施加后，试样高度呈现出短时间内快速降低，而后缓慢减小并逐渐趋于稳定。这主要是由土体内部力学与化学性质变化所导致，一方面荷载突然增大，土颗粒间的有效应力来不及传递，使得土体抗剪强度未能提高，上部荷载作用下的剪应力超过了土体的抗剪强度，另一方面土体中的孔隙水压力增大，水分子溶解盐分的量增加，使得土颗粒间盐分胶结骨架损失严重，这两方面因素导致垂直压力施加后试样快速发生大幅度沉降，但随着时间的推移，溶解盐分的敏感程度逐渐减弱，直至该级垂直压力下盐分完全溶解，变形基本结束，曲线趋于稳定。

(3) 同一试样所施加的垂直压力越大，试样变形达到稳定值所需的时间越长。由于垂直压力越大，土颗粒间的相对位移越大，且孔隙水压力的消散和有效应力传递所需的时间越长，土体内部结构达到稳定状态越慢，所以试样达到变形稳定的时间也就越长。

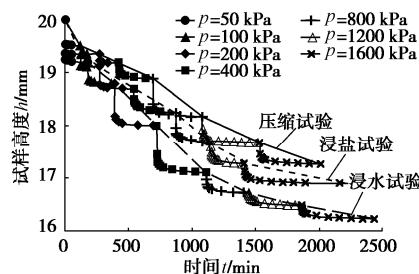


图5 不同试验中试样高度时程曲线($\theta=14 \text{ g/kg}$)

Fig. 5 Time-history curves of sample height in different tests ($\theta=14 \text{ g/kg}$)

图6为浸水试验不同NaCl含量的试样高度变化曲线。可见，同一NaCl含量下试样的高度随垂直压力的增加逐渐降低，在垂直压力小于800 kPa时，试样高度降低较陡，在垂直压力大于800 kPa后，试样高度降低相对平缓。相同试验条件下试样稳定后的高度变化曲线随NaCl含量的增加逐渐向下移动，即NaCl含量较高的试样高度降低得较多，变形量较大。

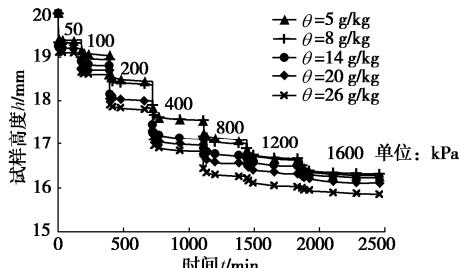


图 6 不同 NaCl 含量浸水试验试样高度的时程曲线

Fig. 6 Time-history curves of sample height with different NaCl contents in pure water immersion tests

3 结 论

(1) 基于黄土湿陷试验的思路, 提出了原含水率、浸纯水和浸饱和 NaCl 溶液三种黄土压缩试验方法, 将浸饱和 NaCl 溶液与原含水率压缩试验的变形差值和浸纯水与浸饱和 NaCl 溶液试验的变形差值分别定义为湿陷量和溶陷量, 从而很好地将湿陷和溶陷区分开, 该方法操作简单、方便可行。

(2) 当 NaCl 含量为 10 g/kg 左右时, 溶陷作用与湿陷作用基本一致; 随 NaCl 含量的增加试样变形的主导因素由湿陷作用转向溶陷作用; 随 NaCl 含量的增加, 峰值溶陷系数近似呈幂函数增大, 峰值湿陷系数呈线性减小, 溶陷起始压力近似呈指数减小。

(3) 三种试验的峰值垂直压力均为 400 kPa; 在垂直压力大于 800 kPa 后, 变形系数基本达到稳定; 试样高度在垂直压力施加后呈现出先快速降低、后缓慢减小并趋于稳定的趋势, 垂直压力越大, 试样稳定越慢。

参考文献:

- [1] 张爱军, 邢义川, 胡新丽, 等. 伊犁黄土强烈自重湿陷性的影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增刊 2): 117 - 122. (ZHANG Ai-jun, XING Yi-chuan, HU Xin-li, et al. Influence factors of strong self-weight collapsibility of Ili loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(S2): 117 - 122. (in Chinese))
- [2] 孙德安, 张谨绎, 宋国森. 氯盐渍土土-水特征曲线的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 955 - 960. (SUN De-an, ZHANG Jin-yi, SONG Guo-seng. Experimental study of soil-water characteristic curve of chlorine saline soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4): 955 - 960. (in Chinese))
- [3] 蔡正银, 吴志强, 黄英豪, 等. 含水率和含盐量对冻土无侧限抗压强度影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(9): 1580 - 1586. (CAI Zheng-yin, WU Zhi-qiang, HUANG Ying-hao, et al. Influence of water and salt contents on strength of frozen soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(9): 1580 - 1586. (in Chinese))
- [4] 颜荣涛, 赵续月, 于明波, 等. 盐溶液饱和黏土的等向压缩特性[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 129 - 138. (YAN Rong-tao, ZHAO Xu-yue, YU Ming-bo, et al. Isotropic compression characteristics of clayey soil saturated by salty solution[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(1): 129 - 138. (in Chinese))
- [5] 张爱军, 王毓国, 邢义川, 等. 伊犁黄土总吸力和基质吸力土水特征曲线拟合模型[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(6): 1040 - 1049. (ZHANG Ai-jun, WANG Yu-guo, XING Yi-chuan, et al. SWCC fitting models of total and matrix suction for Ili loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(6): 1040 - 1049. (in Chinese))
- [6] 高树森, 师永坤. 碎石类土盐渍化评价初探[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(3): 96 - 99. (GAO Shu-sen, SHI Yong-kun. Preliminary study on salinization evaluation of gravelly soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(3): 96 - 99. (in Chinese))
- [7] 杨晓华, 张志萍, 张莎莎. 高速公路盐渍土地基溶陷特性离心模型试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2010, 30(2): 5 - 9. (YANG Xiao-hua, ZHANG Zhi-ping, ZHANG Sha-sha. Centrifugal model test on dissolve collapse of saline soil under expressway[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2010, 30(2): 5 - 9. (in Chinese))
- [8] 宋通海. 氯盐渍土溶陷特性试验研究[J]. 公路, 2007(12): 191 - 194. (SONG Tong-hai. Test and research on collapsibility of chlorine saline soil[J]. Highway, 2007(12): 191 - 194. (in Chinese))
- [9] 梁维云, 韦昌富, 颜荣涛, 等. NaCl 溶液饱和膨胀土的压缩特性及其微观机制 [J]. 岩土力学, 2019, 40(12): 4759 - 4766. (LIANG Wei-yun, WEI Chang-fu, YAN Rong-tao, et al. Microstructure and compression characteristics of NaCl solutions saturated expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(12): 4759 - 4766. (in Chinese))

(编校: 明经平)