

# 粗颗粒盐渍土溶陷性影响因素研究\*

程东幸<sup>①②</sup> 刘志伟<sup>①</sup> 柯学<sup>①</sup>

(①中国电力工程顾问集团西北电力设计院 西安 710032)

(②冻土工程国家重点实验室 兰州 730000)

**摘要** 粗颗粒盐渍土是近年来西北地区工程建设中常遇到、且比较棘手的一种特殊土。为了研究该类特殊土的工程特性,本文在新疆东北部和甘肃河西走廊地区选择了4个试验场地的28个现场试验点和576件室内试样对进行了溶陷性研究,结果显示:当地基土中易溶盐含量超过0.5%~1%以上,且地基土渗透系数不小于 $10^{-7}$ 时,常会发生溶陷现象。同时发现在温度、易溶盐成分、水等共同作用下的地基土周期性胀缩现象比单一的盐胀或溶陷对建筑物安全影响更大。

**关键词** 粗颗粒盐渍土 溶陷 影响因素 地层结构 易溶盐分布形态

中图分类号:TU41 文献标识码:A

## FIELD AND LABORATORY TESTS FOR INFLUENTIAL FACTORS ON SALT RESOLVING SLUMP OF COARSE PARTICLE SALINE SOIL

CHENG Dongxing<sup>①②</sup> LIU Zhiwei<sup>①</sup> KE Xue<sup>②</sup>

(①Northwest Electric Power Design Institute of China Power Engineering Consulting Group, Xi'an 710032)

(②State Key Laboratory of Forest Engineer, Lanzhou, 730000)

**Abstract** In recent years, coarse particle saline soil as a kind of special soils is often encountered in engineering construction in northwest China. In order to grasp the special engineering properties of the soil mass, this study selects 28 test points and 576 pieces samples of 4 test sites in northeastern Xinjiang and Hexi regions of Gansu Province to collapsible testing research. The test results show that the foundation soil can cause salt resolving slump when the easy resolving salt content exceeds 0.5%~1% and the permeability coefficient no less than  $10^{-7}$ . At the same time, the test results show that soil's periodic expansion and contraction phenomenon are more dangerous than single salt expansion and salt resolving slump.

**Key words** Coarse particle saline soil, Salt resolving slump, Influential factors, Stratum structure, Easy resolving salt distribution

## 1 引言

“粗颗粒盐渍土”一词,在20世纪90年代初国

内许多专家研究甘肃河西走廊和新疆地区盐渍土工程特性时就已提出,但至今从文献查阅可知没有具体的定义。程东幸等<sup>[1]</sup>近年在从事该类土的课题研究时,给出了如下粗颗粒盐渍土的定义:砾径大于

\* 收稿日期:2012-04-20;收到修改稿日期:2012-06-29.

基金项目:冻土工程国家重点实验室开放基金 SKLFSE201215 的资助.

第一作者简介:程东幸,主要从事边坡稳定性分析及特殊土研究. Email: chengdongxing759@163.com

2mm 的粗粒组质量大于总质量的 50%, 级配良好且其含盐总量大于 0.3% 的砂土或碎石土。

粗颗粒盐渍土在我国分布比较广泛, 而在干旱的西北地区尤为集中。由于其具有盐胀、溶陷及腐蚀等特性, 因此常给工程建筑物带来安全隐患和危害, 以致引发巨大的经济损失。这种现象不管在石油、铁路还是电力行业均屡见不鲜。

关于粗颗粒盐渍土的研究, 目前可查阅的文献并不多, 主要是因为粗颗粒盐渍土分布地区经济落后, 大规模经济建设没有全面开展起来, 国家投入和学术关注度均较低造成的。近些年来, 随着国家经济结构的调整, 尤其是西北地区大发展的实施, 使得绝大多数工程都面临棘手的盐渍土问题, 而针对粗颗粒盐渍土这一难题, 目前国内还没有统一的规范和指南等可借鉴和参阅, 这就为工程的实施带来了前所未有的困难和挑战。

我国把粗颗粒盐渍土单独列出来进行研究是 20 世纪 90 年代初石油行业在新疆地区首先碰到并提出来的。高树森等<sup>[2]</sup>最早对粗颗粒盐渍土的研究体系进行了质疑和探讨, 后来华遵孟<sup>[3]</sup>、罗炳芳<sup>[4]</sup>、丁兆民等<sup>[5]</sup>都对粗颗粒盐渍土的深入认识开展了大量工作。由于受到研究费用和工程实践的限制, 很多成果基于室内试验, 很少进行现场测试, 而室内试验的结果因在重塑状态下获得, 无法模拟场地盐渍土的原状结构, 因此, 其结果的可靠性和可用性还需进一步验证。本文作者针对粗颗粒盐渍土工程实践中碰到的一些问题, 结合目前的研究现状, 在近 3a 内, 从甘肃河西走廊和新疆东北部地区选择的 4 个试验场地共计 28 个现场试验点采集 576 件室内样品进行了对比研究, 其成果已经成功应用于工程实践, 尤其是粗颗粒盐渍土溶陷性方面的研究, 对场地地基方案的优化以及工程投资费用节省等都具有重要的意义。

## 2 粗颗粒盐渍土溶陷性的工程危害

盐渍土对工程建设的危害是多方面的。据不完全的调查统计, 每年因此造成的直接经济损失可高达上亿元。

粗颗粒盐渍土的溶陷危害主要是指地基土中易溶盐溶解, 地基土原始结构破坏, 强度丧失, 使地基承载力降低, 并产生沉陷变形造成的建筑物损坏。据统计, 不论是电力行业还是其他行业, 溶陷引起的建筑物破坏问题很多, 如某变电所, 由于溶陷引起开

关站的开关发生错位, 导致开关无法正常打开和关闭 (图 1); 又如某钾肥厂, 由于生活用水和工程用水的影响, 建成 1a 后地基就发生了最大达 20cm 的溶陷变形 (图 2)。



图 1 某开关站溶陷变形

Fig. 1 Collapsible deformability of a switch station



图 2 某钾肥厂建筑物溶陷变形

Fig. 2 Collapsible deformability of a potash fertilizer plant

受含盐量、地层结构状态、易溶盐分布形态、骨架颗粒、充填物成分等的影响, 浸水状态下, 粗颗粒盐渍土的沉陷变形差异很大, 因此, 这也构成了粗颗粒盐渍土研究的难点和工程建设中的关键点。

## 3 粗颗粒盐渍土溶陷性的影响因素

### 3.1 含盐量

土中盐分的存在, 是地基土产生溶陷的基础。粗颗粒盐渍土的溶陷性与其含盐类型、数量及可溶程度都有密切关系。一般情况下, 地基土中易溶盐含量越高, 其溶陷能力就越强, 反之, 易溶盐含量越低, 则其溶陷能力相应较弱。这种现象不管在平面上还是剖面上均有明显表现。如新疆五彩湾某盐渍土<sup>[6]</sup>场地, 表层 2m 深度内地层易溶盐含量明显高于 2m 以下易溶盐含量 (图 3), 则溶陷差别很大。2m 以上地基土为溶陷性的, 而 2m 以下地基土为非溶陷性 (表 1); 又如, 哈密某盐渍土场地<sup>[7]</sup>, 由于表层土含盐量的不均衡性 (图 4), 在同一深度, 不同平面的地基土中, 其溶陷性差异很大 (表 1)。

通过对新疆哈密、新疆鄯善、新疆五彩湾及甘肃常乐4个粗颗粒盐渍土地现场浸水试验发现:发生溶陷的场地,易溶盐含量均超0.5%,大多数含盐量都在0.5%~1%之上。

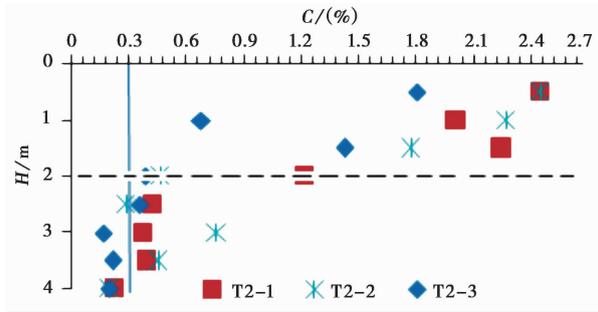


图3 同一剖面含盐量变化情况

Fig. 3 Salinity changes of the same profile

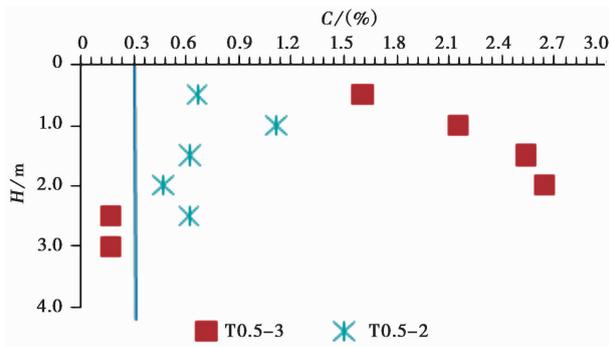


图4 同一平面含盐量变化情况

Fig. 4 Salinity changes of the same plane

表1 含盐量对粗颗粒盐渍土溶陷性影响

Table 1 Collapsible impact of salt content

| 溶陷性  | 类别    |        |        |        |
|------|-------|--------|--------|--------|
|      | 同一剖面  |        | 同一平面   |        |
|      | 2m 以上 | 2m 以下  | T0.5~2 | T0.5~3 |
| 溶陷系数 | 0.017 | 0.0019 | 0.022  | 0.041  |

### 3.2 地层结构

地层结构对粗颗粒盐渍地基土溶陷性的影响主要表现为两个方面:一是地层岩性的分布特征。通常情况下以纯粗颗粒为主的地基土,由于其渗透性大,潜蚀作用明显,表现为地基土溶陷能力强,而有细粒夹层或黏土充填的粗颗粒盐渍地基土,由于渗透性弱,潜蚀作用受到明显限制,因此大多数情况地基土是非溶陷性的或溶陷性很弱的;二是地层的胶结程度,胶结程度的强弱表现在粗颗粒盐渍土中,主要是渗透性的问题。如新疆鄯善某盐渍土地<sup>[8]</sup>,上部角砾层基本处于半成岩状态(图5),虽然含盐

量很高(0.72%~40.91%),但由于低的渗透性、浅的浸润深度以及小的沉陷量,使得地基土的溶陷系数非常低;而甘肃常乐某盐渍土地<sup>[9]</sup>,由于表层地基土松散,渗透性非常强,因此,易溶盐的溶解和潜蚀作用充分发挥,故地基土的溶陷性很明显(表2)。



图5 新疆鄯善某电厂地层

Fig. 5 Plant formation of Xingjiang Shanshan

表2 地层胶结对盐渍土溶陷性的影响

Table 2 Collapsible impact of formation cementation

| 类别                      | 场地                    |                      |
|-------------------------|-----------------------|----------------------|
|                         | 新疆鄯善                  | 甘肃常乐                 |
| 天然密度/ $g \cdot cm^{-3}$ | 2.2                   | 1.9                  |
| 渗透系数/ $cm \cdot s^{-1}$ | $2.71 \times 10^{-7}$ | $8.2 \times 10^{-3}$ |
| 溶陷系数                    | 0.0043                | 0.0121               |

### 3.3 易溶盐分布形态

通过大量工程调研发现,盐渍地基土中的盐分,通常情况下呈层状或带状分布(图6),这种分



图6 地基土中盐分布形态

Fig. 6 Easy resolving salt distribution of the foundation

布形态使得现场浸水试验时,常常表现为大的沉降量和强的溶陷性,而当取扰动样进行室内试验时,破坏了原状地层结构,使得易溶盐均匀分布在试样中,故现场溶陷的地基土室内重塑试验时,结果常表现为非溶陷性,这样则很难准确反映场地真实情况。为了验证改变场地土易溶盐分布形态对地基土溶陷性的影响,在新疆五彩湾某盐渍土场地进行了现场原状地层和开挖、搅拌、回填碾压(图7~图9)地基土的浸水溶陷对比试验研究<sup>[10]</sup>,结果显示,盐渍土中易溶盐分布形态改变后,溶陷性能发生明显的变化(表3),同时也说明,改变地基土中盐分的分布形态,对于消除地基土的溶陷性是一种较好的方法。

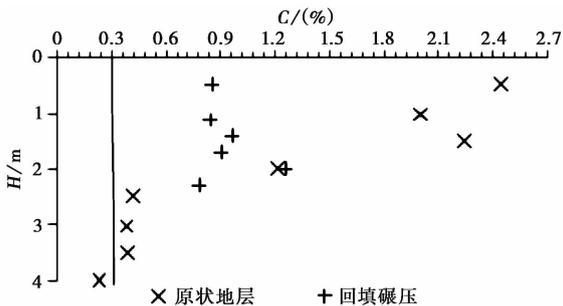


图7 原状、重塑状态下易溶盐分布

Fig. 7 Easy resolving salt distribution under the undisturbed and remodeling state



图8 回填碾压试验

Fig. 8 Backfill compaction test

### 3.4 骨架颗粒含量

粗颗粒是盐渍地基土的支撑体,起到骨架的作用。通常情况下,盐渍地基土中,粗颗粒含量越高,对溶陷的抑制性就越强。《盐渍土地区建筑规范》(SY-T 0317-1997)<sup>[11]</sup>规定:当盐渍土中洗盐后粒径大于2mm的颗粒超过全重70%时,可判为非溶陷性土,但国家标准《盐渍土地区建筑技术规范》



图9 回填碾压试验

Fig. 9 Backfill compaction test

表3 新疆五彩湾某盐渍土场地不同工况下溶陷性试验结果

Table 3 Collapsible result under different conditions

| 内容   | 工况     |        |
|------|--------|--------|
|      | 原状结构地层 | 回填碾压   |
| 层位   | T2-1   | T2-1   |
| 岩性   | 角砾     | 角砾     |
| 溶陷系数 | 0.017  | 0.0075 |

(征求意见稿, 2011a)<sup>[12]</sup>中又取消了粒径大于2mm的颗粒含量超过全重70%时判为非溶陷性土的规定,可见,至目前关于粗颗粒盐渍土一些定量化的研究仍然处于探索中,但总体来说,骨架颗粒含量的提高在一定程度上对于抑制地基土的溶陷性是有作用的。如哈密某盐渍土场地,洗盐后大于2mm的颗粒比重56.4%(平均),对应平均溶陷系数为0.0315,而新疆五彩湾某盐渍土场地,洗盐后大于2mm的颗粒比重为61.58%(平均),对应平均溶陷系数为0.017(表4)。

表4 骨架颗粒含量与地基土的溶陷性

Table 4 Skeleton particles content and the foundation collapsibility

| 类别           | 场地                 |                    |       |        |        |        |
|--------------|--------------------|--------------------|-------|--------|--------|--------|
|              | 五彩湾某场地             |                    |       | 哈密某场地  |        |        |
|              | T② <sub>1</sub> -1 | T② <sub>1</sub> -2 | 平均值   | T0.5~2 | T0.5~3 | 平均值    |
| >2mm 样含量/(%) | 60.02              | 63.14              | 61.58 | 53.3   | 59.5   | 56.4   |
| 溶陷系数         | 0.0128             | 0.0215             | 0.017 | 0.022  | 0.041  | 0.0315 |

### 3.5 温度

在充分浸水的工况下,温度是影响盐渍地基土溶陷性的又一关键因素之一。统计发现:对于易溶盐,在一定的区间内,随着温度升高,易溶盐的溶解度会明显增大,而随着温度降低,溶解度减小,则出现盐分的析出,这样则导致地基土发生胀缩现象,对建筑物的安全影响很大。新疆鄯善某盐渍土场地,浸水试验时间段为2011年3月初,当时场地温度变

化区间为 2~11℃,易溶盐溶解过程中,随着温度变化,在 200kPa 的压力下,仍然出现了明显的胀、缩现象(图 10,图 11),其中胀的现象出现在早晨温度较低的时候,而陷的现象出现在下午温度较高的时候。

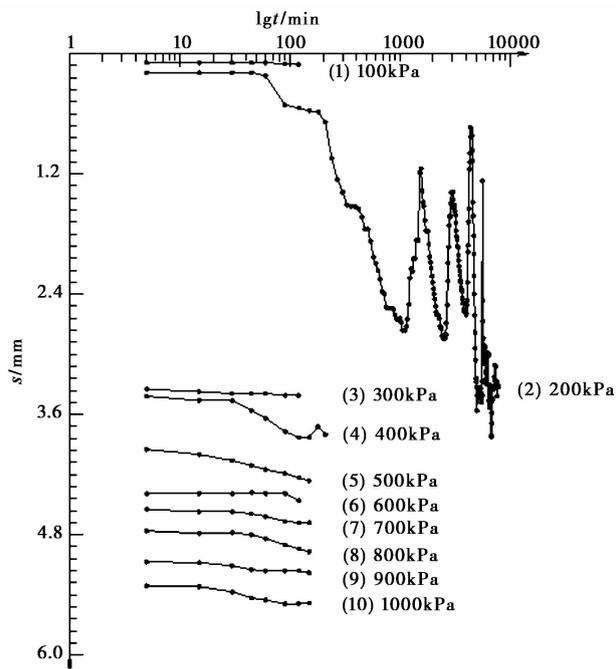


图 10 试验点位移-时间曲线

Fig. 10 Displacement-time curve of test point

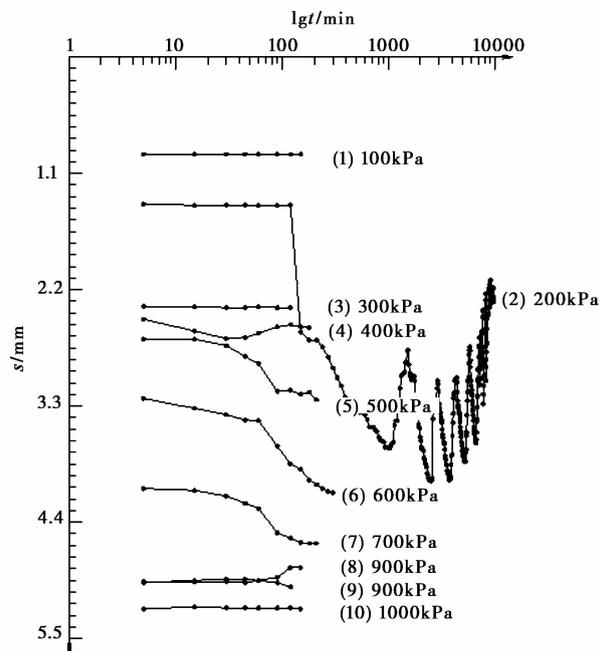


图 11 试验点位移-时间曲线

Fig. 11 Displacement-time curve of test point

从某种程度来说,盐渍土随着温度出现的这种周期性胀缩现象,对于建筑物的安全影响比单纯的盐胀或溶陷更大。周期性的胀缩现象不仅疏松了建筑物底部的地基土,而且使得内部骨架颗粒出现错动、重新排列现象,对地层结构的破坏以及地基承载力的影响很大。

### 3.6 其他因素

除了含盐量、地层结构、易溶盐分布形态、骨架颗粒含量及温度影响外,地基土中充填物成分、浸水水质等都是影响粗颗粒盐渍土溶陷变形的因素。因此,盐渍土的溶陷性研究,是一项系统的工程,不是单纯的以含盐量多寡来简单界定的。

## 4 结论

从上述分析可知,粗颗粒盐渍地基土的溶陷是众多因素共同作用的结果,任何一个单独的因素难以起到决定性的作用,总体起来可概括如下:

(1)易溶盐含量是界定地基土是否为盐渍土的决定性因素,但不是确定地基土是否溶陷的唯一因素。通过现场浸湿试验发现,粗颗粒盐渍土发生溶陷的含盐量一般都在 0.5%~1% 之上,在其他因素一定的工况下,易溶盐含量越高,地基土的溶陷性越明显;

(2)由地基土结构形态本质可知,渗透系数是影响粗颗粒盐渍地基土溶陷的关键因素之一。试验发现:当溶陷系数小于  $10^{-7}$  时,无论易溶盐含量多高,浅的浸水深度和小的变形量,决定了地基土弱的溶陷性。通常情况下,地基土都以非溶陷性态形式为主;

(3)试验发现,破坏盐渍地基土原状结构后,使得地基土中的易溶盐形态发生改变,使其均匀分布于地基土中后,对于削弱或消除盐渍地基土的溶陷性是一种较好的方法;

(4)在温度、渗透性及易溶盐成分等共同作用下,粗颗粒盐渍地基土可能出现周期性的胀缩现象,这种作用会疏松地基土,使得地基土结构发生破坏,对建筑物安全的影响要大于单一的溶陷或盐胀作用;

(5)由大量试验可知,粗颗粒盐渍土中,骨架颗粒含量越高,对于抑制地基土的溶陷性越明显。

## 参 考 文 献

- [1] 程东幸, 刘富亭, 张希宏. 粗颗粒盐渍土工程特性研究[R]. 西安:西北电力设计院, 2009.  
Cheng Dongxing, Liu Futing, Zhang Xihong. Study on the Engineering Characteristics of Coarse Saline Soil. Xi'an: Northwest Electric Power Design Institute, 2009.
- [2] 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 Shuseng, Shi Yongkun. Pre-test of gravel type saline soil. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **18**(3): 96~99.
- [3] 华遵孟, 沈秋武. 西北内陆盆地粗颗粒盐渍土研究[J]. 工程勘察, 2001, (1): 28~31.  
Hua Zunmeng, Sheng Qiuwu. Study on coarse saline soil of northwestern inland basin. Geotechnical Investigation & Surveying, 2001, (1): 28~31.
- [4] 罗炳芳, 潘菊英. 粗颗粒易溶盐含量测定方法的研究[J]. 公路, 2006, (11): 192~193.  
Luo Bingfang, Pan Juying. Study on the soluble salt content's determination method of coarse saline soil. Highway, 2006, (11): 192~193.
- [5] 丁兆民, 张莎莎, 杨晓华. 粗颗粒盐渍土路用填料指标研究[J]. 杂志??, 2008, **30**(4): 623~631.  
Ding Zhaomin, Zhang Shasha, Yang Xiaohua. Experimental studies of the applicability index of coarse-grained salty soil as an embankment filling. 杂志??, 2008, **30**(4): 623~631.
- [6] 西北电力设计院. 新疆神火4×350MW 动力站工程厂区盐渍地基土试验研究专题报告[R]. 西安, 2011.  
Northwest Electric Power Design Institute. Test Report of the Site Saline Soil of Xingjiang Shenhua 4×350Mw Power Station Project. Xi'an, 2011.
- [7] 西北电力设计院. 哈密±800kV 换流站工程站址区盐渍土地基浸水载荷试验研究专题报告[R]. 西安, 2011.  
Northwest Electric Power Design Institute. Test Report of the Site Saline Soil of Hami±800kV Converter Station. Xi'an, 2011.
- [8] 西北电力设计院. 新疆万向鄯善库木塔格热电联产工程厂区盐渍土地基试验研究专题报告[R]. 西安, 2011.  
Northwest Electric Power Design Institute. Test Report of the Site Saline Soil of Xingjiang Wangxiang Cogeneration Project. Xi'an, 2011.
- [9] 西北电力设计院. 甘肃电投常乐电厂工程厂区盐渍地基土试验研究专题报告[R]. 西安, 2009.  
Northwest Electric Power Design Institute. Test Report of the Site Saline Soil of Changle Power Plant of Gansu Province. Xi'an, 2009.
- [10] 西北电力设计院. 新疆神火4×350MW 动力站工程回填土碾压试验研究专题报告[R]. 西安, 2011.  
Northwest Electric Power Design Institute. Special Report of Backfill Compaction Test of Xingjiang Shenhua 4×350Mw Power Station Project. Xi'an, 2011.
- [11] 中国石油天然气总公司. 盐渍土地区建筑规范(SY/T 0317-97)[S]. 1997.  
China National Petroleum Company. Building Code for Saline Soil Region(SY/T 0317-97). 1997.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 盐渍土地区建筑技术规范征求意见稿).  
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Technical Code for Building Construction in Saline Soil Regions(exposure draft).