

DOI: 10.11779/CJGE2021S2049

# 盐渍化软基土动力学特性研究

陈志敏<sup>1,2</sup>, 李江鹏<sup>1</sup>, 范长海<sup>1</sup>, 周飞<sup>1</sup>

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 兰州交通大学道桥工程灾害防治技术国家地方联合工程实验室, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 盐渍化软土路基容易产生翻浆、盐胀、冻胀、腐蚀等不良工程特性, 因此研究其力学特性意义重大。开展了室内土工试验, 据现场勘察提出了4种盐渍化软基处置方案。并针对改良的盐渍化软土和重塑土动力特性进行研究, 主要对比分析盐渍软土以及两类改良盐渍软土的动剪切模量比和阻尼比随应变变化的关系, 试验结果表明: 掺入水泥石灰粉煤灰对路基的承载力改善优于砂砾。两种改良土的动弹性模量都明显增加, 且水泥石灰粉煤灰的对盐渍化软土动力特性的提升效果明显优于砂砾。

**关键词:** 盐渍化软基; 动三轴试验; 动剪切模量比; 阻尼比

**中图分类号:** TU447      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2021)S2-0208-05

**作者简介:** 陈志敏(1979—), 男, 教授, 博士, 主要从事岩土工程方面的教学和科研。E-mail: czm@mail.lzjtu.cn。

## Dynamic characteristics of salted soft soil

CHEN Zhi-min<sup>1,2</sup>, LI Jiang-peng<sup>1</sup>, FAN Chang-hai<sup>1</sup>, ZHOU Fei<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. National and Local Joint Engineering Laboratory of Road and Bridge Engineering Disaster Prevention and Control Technology, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** The saline soft soil roadbed is easily subjected to poor engineering characteristics such as mud boiling, salt heave, frost heave and corrosion, so it is of great significance to study its mechanical characteristics. The indoor geotechnical tests are carried out, and four treatment schemes for saline soft foundations are put forward based on the on-site surveys. The dynamic characteristics of the improved saline soft soil and remolded soil are investigated, and the relationship between the dynamic shear modulus ratio and the damping ratio of the saline soft soil and the two types of improved saline soft soil with strain is compared and analyzed. The results show that the improvement of the bearing capacity of the roadbed by adding cement, lime and fly ash is better than that by adding sand gravel. The dynamic elastic modulus of the two kinds of improved soils significantly increase, and the improvement effect of cement lime fly ash on the dynamic characteristics of saline soft soil is obviously better than that of sand gravel.

**Key words:** salted soft foundation; dynamic triaxial test; dynamic shear modulus ratio; damping ratio

## 0 引言

软土地基具有含水率大、强度低、压缩性高、渗透性弱等特征, 在受到扰动或振动时易丧失强度<sup>[1]</sup>。万胜等<sup>[2]</sup>以鄱阳湖区典型软土为例, 利用GDS三轴剪切试验研究了湖相软土的三轴剪切应力-应变曲线、基质吸力与偏应力的关系、围压与偏应力的关系, 邱国阳等<sup>[3]</sup>基于软土的常规三轴固结排水蠕变试验, 得到了温州地区原状软土在不同应力状态下的蠕变试验曲线。而有研究表明行车动荷载对软基土变形的影响要大于静荷载的影响<sup>[4]</sup>。马剑飞等<sup>[5]</sup>利用意大利Controls公司的WF动三轴仪进行固结和多振次循环荷载试验, 研究了交通荷载作用下软土变形特征及微结构演变, 崔兵等<sup>[6]</sup>通过设计的交通荷载作用下低路堤软黏土地基动力模型试验, 得到了低路堤软黏土地基在交

通荷载不同强度、不同频率作用下的土压力和孔隙水压力变化规律。Hyde等<sup>[7]</sup>用Keuper Marl淤泥质黏土, 在蠕变荷载和反复荷载下分别进行循环加载试验。试验结果表明, 可以采用应变速率和时间关系来反映塑性应变的累积, 应变速率没有明显的变化。Muhanna<sup>[8]</sup>曾进行过土三轴循环加载试验, 分析循环加载所产生的塑性变形行为。上述文献中对动荷载下公路软基力学行为研究多以原状土为主, 很少对改良后的软土力学行为开展研究。

学者对盐渍化软基提出了很多处理方法<sup>[9-11]</sup>。我国西北地区盐渍土分布广泛, 但尚无见诸报道的软流塑—软塑状态黄土状粉土与盐渍土结合的工程案例。

通过室内土工试验和动荷载三轴试验, 在地基土处理方案得基础上, 对不同配方的盐渍化软土的动力特性对比研究, 提出了改良盐渍化软土的最优配。

甘肃境内某高速公路局部位置地势低洼, 路线两头略高, 中段较低, 受灌溉影响, 地下水位较高, 常年渗水。地层表层黄土粉土呈流塑—软塑状态, 工程力学性质差, 承载力低, 特殊岩土为松软土和盐渍土。

## 1 室内土工试验

### 1.1 盐渍软土基本物理特性试验

主要进行的试验有: 基本物理参数测定、液塑限测定、筛分试验。

#### (1) 盐渍软土基本物理参数试验

据统计, 黄土的干密度一般常介于  $1.40\sim1.70\text{ g/cm}^3$ <sup>[10]</sup>, 如图 1 所示地表以下 7 m 内的平均干密度为  $1.61\text{ g/cm}^3$ 。据统计, 黄土的干密度一般常介于  $43\%\sim53\%$ <sup>[10]</sup>, 如图 2 所示地表以下 7 m 内的平均孔隙率为  $40.65\%$ , 孔隙率偏低。

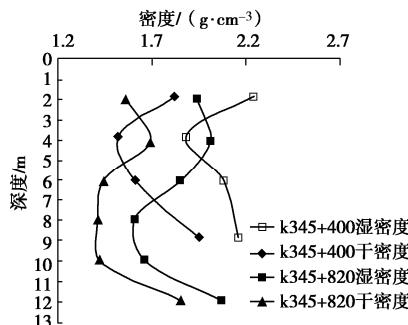


图 1 湿密度和干密度随深度变化曲线

Fig. 1 Change of wet density and dry density with depth

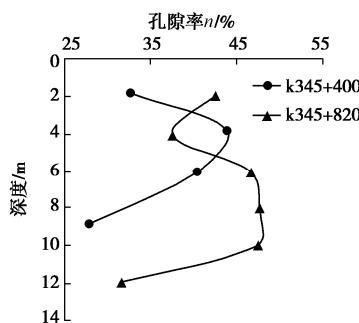


图 2 孔隙率随深度变化曲线

Fig. 2 Change of porosity with depth

#### (2) 盐渍软土的液塑性参数试验

绘制含水率、液限和塑限随深度变化曲线如图 3 所示。

由试验结果得塑性指数平均值为 10.1, 由图 3 可得地表以下 7 m 内的平均天然含水率为 17.9%, 介于

平均塑限含水率 14.05% 和平均液限含水率 22.13% 之间, 且液性指数  $I_L$  处于  $0.09\sim0.93$ 。

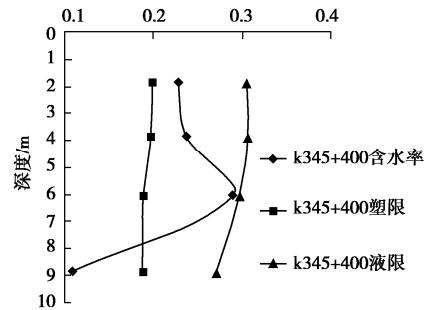


图 3 含水率、液限和塑限随深度变化

Fig. 3 Change of water content, liquid limit and plastic limit with depth

#### (3) 土工筛分试验

由筛分结果可得地表深度小于 5 m 时, 土颗粒直径小于  $0.5\text{ mm}$ , 且绝大部分为  $0.075\text{ mm}$  以下粒径;  $0.5\sim2\text{ m}$  深度范围为黄土状粉土, 且呈流塑—软塑状态, 此类土排水性较差, 且本身力学性能较差, 再加之含水率较大, 承载力极低。其下为砂土, 主要为粉细砂、中粗砂及砾砂, 厚  $2\sim5\text{ m}$ 。

### 1.2 基于盐渍化软基的处理方案研究

针对盐渍软土工程特性研究的现有成果, 通过调研, 在排水与减水的基础上, 选用如下 4 种地基处治方案做为提出优化方案的基础。

(1) 片石挤淤预压方案具体措施: 地基清表  $30\text{ cm}$  后再下挖  $50\text{ cm}$ , 换填  $150\text{ cm}$  厚片石, 上部再填筑  $130\text{ cm}$  厚的砂砾土。

(2) 水泥灰土改良方案: 地基清表  $30\text{ cm}$  后再下挖  $50\text{ cm}$ , 对其下  $150\text{ cm}$  盐渍软基添加水泥、粉煤灰和石灰等材料进行改良。

(3) 强夯置换墩方案具体措施: 地基清表  $30\text{ cm}$  后再下挖  $50\text{ cm}$ , 按正三角形布设夯点。

(4) 高压喷射注浆方案具体措施: 地基清表  $30\text{ cm}$  后再下挖  $50\text{ cm}$ , 利用高压喷射水泥浆处理盐渍土软基。

## 2 改良盐渍软土试验

### 2.1 试验方案

在重塑土试样基础上, 采用两种基本配方, 并分别调整相关成分含量, 各形成 3 种不同改良配比的配方, 如表 1 所示, 分别进行轻型击实试验和三轴试验以探寻改良效果与规律。

### 2.2 轻型击实试验结果分析

按照不同配方两类试样土, 分别掺入不同比例的

水, 测量其在不同含水率下的干密度, 最终得出 I-1、I-2、I-3 型试样土和 II-1、II-2、II-3 型试样土的最优含水率和最大干密度的关系, 见图 4、5。

表 1 盐渍软土试件配方

Table 1 Schemes of saline soft soil samples

试样类型	配方	对应处治方案	原有地层, 不掺加材料
			重塑土
I型/砂砾含量百分比	I-1	40%	—
	I-2	60%	片石挤淤预压方案
	I-3	80%	强夯置换墩方案
II型/水泥：粉煤灰：石灰：盐渍土的重量比	II-1	0.04:0.3:0.06:0.6	—
	II-2	0.06:0.25:0.06:0.63	高压喷射注浆方案
	II-3	0.08:0.20:0.06:0.66	水泥灰土改良方案

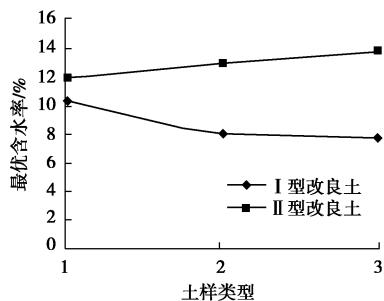


图 4 最优含水率变化曲线

Fig. 4 Change of optimal moisture content

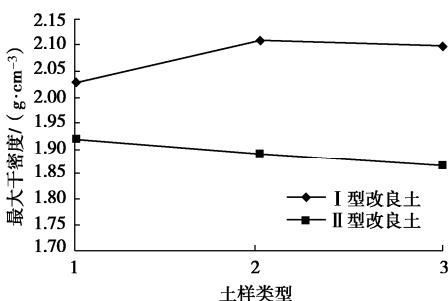


图 5 最大干密度变化曲线

Fig. 5 Change of maximum dry density

I 型改良盐渍土砂砾含量增大, 最优含水率降低, II 型改良盐渍土随着水泥、石灰含量的增加, 最优含水率依次增大。II 型改良盐渍土的最优含水率大于 I 型改良盐渍土。

I 型改良盐渍土随着砂砾含量的增加, 由 40% 增加到 60% 时, 最大干密度增加。对于 II 型改良盐渍土在水泥、石灰含量的增加的过程中, 最大干密度减小。I 型改良盐渍土的最大干密度大于 II 型改良盐渍土。可见 II 型改良盐渍土效果更好。

由图 6, 7 可知, I 型改良土当围压为 200, 300 kPa 时峰值主应力差随砂砾含量增加先增加后减小, 因此,

I-2 型改良土在 I 型中其承载特性表现最好。II 型改良土峰值主应力差明显比 I 型改良土要大, 说明 II 型改良土的承载能力较 I 型改良土好。

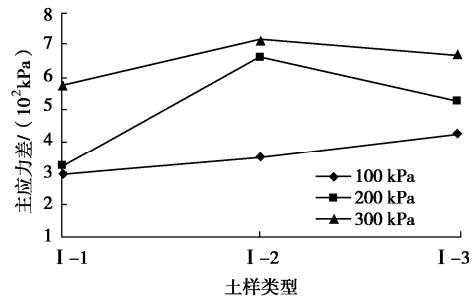


图 6 I 型改良土峰值主应力差随砂砾含量变化曲线

Fig. 6 Change of peak principal stress difference of type I modified soil with gravel content

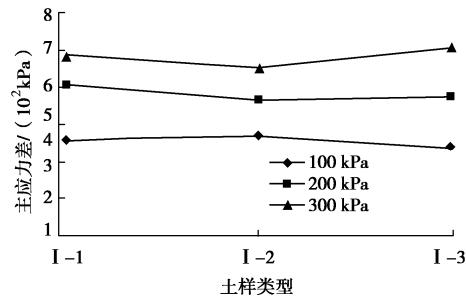


图 7 II 型改良土峰值主应力差随砂水泥、石灰含量变化曲线

Fig. 7 Curve of variation of peak principal stress difference of type II improved soil with sand cement and lime content

### 2.3 三轴试验结果分析

由图 6, 7 可知, I 型改良土当围压为 200, 300 kPa 时峰值主应力差随砂砾含量增加先增加后减小, 因此, I-2 型改良土在 I 型中其承载特性表现最好。II 型改良土峰值主应力差明显比 I 型改良土要大, 说明 II 型改良土的承载能力较 I 型改良土好。对重塑土和 I、II 型改良土的  $c$ 、 $\varphi$  值进行比较, 见表 2, 3。

表 2 重塑土和 I 型土  $c$  和  $\varphi$  值Table 2 Values of  $c$  and  $\varphi$  between remolded soil and type I soil

土样类型	$c/kPa$	$\varphi/(^\circ)$
重塑土	39.2	23
I-1 型土	73.4	24
I-2 型土	106.5	20
I-3 型土	121.6	21

表 3 重塑土和 II 型土  $c$  和  $\varphi$  值Table 3 Values of  $c$  and  $\varphi$  between remolded soil and type II soil

土样类型	$c/kPa$	$\varphi/(^\circ)$
重塑土	39.2	23
II-1 型土	108.7	26
II-2 型土	123.6	29
II-3 型土	100.0	32

加入砂砾后, 对原土样的级配有所改善, 使其黏聚力  $c$  值随着含砂量的增加而增大, 增加值分别为原

重塑土的 4.02 倍、7.34 倍、8.67 倍。试样土中掺入水泥量的增加, 土体试样的  $c$  值先增加后减小, 3 种试样土增加分别为 6.58 倍、8.01 倍、5.71 倍。综合比较而言 II-2 型改良土在 II 型中承载能力表现最好。

### 3 改良盐渍软土动三轴试验

试验得到 I-2 型土动应力 - 动应变等关系如图 8~10 所示。

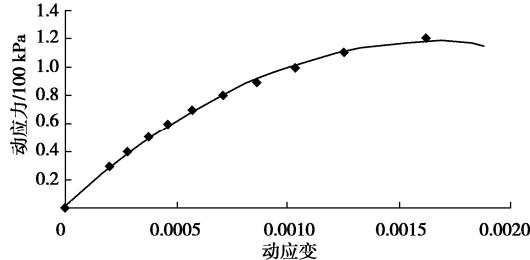


图 8 I-2 型土动应变与动应力关系曲线

Fig. 8 Relationship between dynamic strain and dynamic stress of type I-2 soil

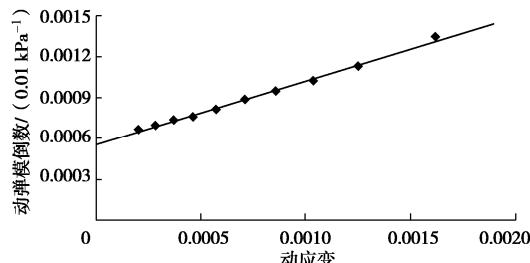


图 9 I-2 型土动应变与动弹模倒数关系曲线

Fig. 9 Relationship between dynamic strain of type I-2 soil and the reciprocal of dynamic elastic modulus

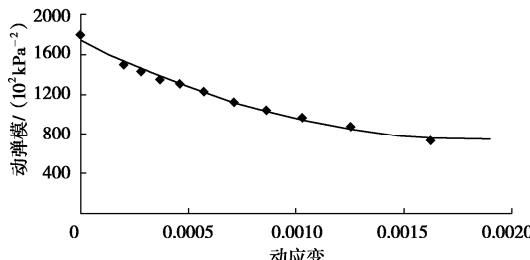


图 10 I-2 型土动应变与动弹模关系曲线

Fig. 10 Relationship between dynamic strain and dynamic elastic modulus of type I-2 soil

图 8 知 I-2 型土的动应力和动应变关系符合双曲线模型, 图 10 知 I-2 型土的动应变与动弹性模量的倒数成正比关系。

将动三轴试验测得的动弹性模量和动应变, 换算为动剪切模量和动剪应变:

$$G = \frac{E_d}{2(1+\nu)} \quad , \quad (1)$$

$$\gamma_d = \varepsilon_d(1+\nu) \quad . \quad (2)$$

式中  $\nu$  为泊松比。对试验结果非线性曲线拟合, 分别得到了 3 条剪模比曲线 ( $G/G_{\max}$  -  $\gamma_d$ ) 和 3 条阻尼比曲线 ( $\lambda$  -  $\gamma_d$ ) 见图 11~13。

主要分析土样的动弹性模量  $E_0$  和阻尼比  $\lambda$ , 以其作为不同处理材料的优劣的标准。其中 I-2 型土、II-2 型土和重塑土 3 种土样的相关参数值见表 4。

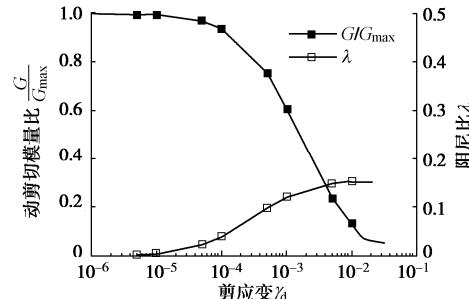


图 11 I-2 型土样动三轴试验结果

Fig. 11 Results of dynamic triaxial tests on type I-2 soil samples

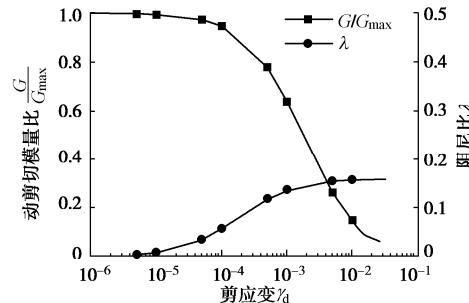


图 12 II-2 型土样动三轴试验结果

Fig. 12 Results of dynamic triaxial tests on type II-2 soil samples

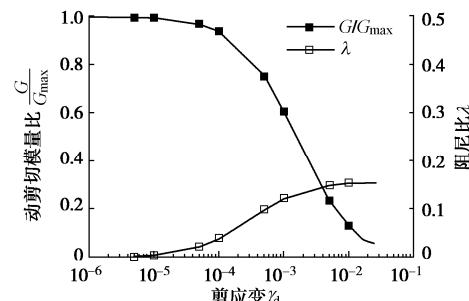


图 13 重塑土样动三轴试验结果

Fig. 13 Results of dynamic triaxial tests remodeled soil samples

表 4 土样动弹性模量  $E_0$  和阻尼比  $\lambda$

Table 4 Values of dynamic elastic modulus and damping ratio of soil samples

土样	动弹性模量 $E_0$ / MPa	阻尼比 $\lambda$
I-2 型	1796.3	0.091~0.131
II-2 型	2212.4	0.087~0.119
重塑土	1258.2	0.097~0.139

改良土的动弹性模量明显增加, I-2 型土和 II-2 型土的值分别为原重塑土的 1.43 和 1.76 倍; 阻尼比范围较重塑土有所降低, II-2 型土降低程度大于 I-2 型土。所以 II-2 型土的动力学性质优于 I-2 型土。

## 4 结 论

(1) I型改良土黏聚力 $c$ 值和 $\varphi$ 值且随着含砂量的增加在 $20^\circ \sim 26^\circ$ 之间变化不大。考虑材料强度提高方面,需要同时考虑 $c$ 和 $\varphi$ 值的变化效应,选择最佳的含砂量。

(2) II型改良土随着试样土中掺入水泥量的增加,土体试样的 $c$ 值先增加后减小, $\varphi$ 值随着掺入水泥量的增加而增加,在 $25.6^\circ \sim 34^\circ$ 。

(3) II型改良土的承载能力较I型改良土好,可见水泥对盐渍化软土的改善效果较砂砾效果更好。

(4) 改良土的动弹性模量明显增加,阻尼比范围较重塑土有所降低,II-2型土降低程度大于I-2型土,II-2型土的动力学性质优于I-2型土。由于II-2型土中水泥石灰发生水化反应,生成了稳定性、强度更高的硅酸钙,而I-2型土中砂砾的加入只是改善了盐渍软基的物理特性,而对动力特性的提升低于水泥。

## 参 考 文 献:

- [1] 乔峰,薄景山,王亮,等.中国软土及其动力学特性研究概况[J].世界地震工程,2019,35(4):150-161.(QIAO Feng, BO Jing-shan, WANG Liang, et al. Survey of China's soft soil and its dynamic characteristics[J]. World Earthquake Engineering, 2019, 35(4): 150 - 161. (in Chinese))
- [2] 万胜,甘建军,李荐华.鄱阳湖区软土三轴剪切强度试验[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(4):202-208.(WAN Sheng, GAN Jian-jun, LI Jian-hua. Experiment on triaxial shear strength of soft soil in Poyang Lake area[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(4): 202 - 208. (in Chinese))
- [3] 邱国阳,陈智寿,谈华顺,等.温州地区典型软土蠕变特性试验研究[J].公路,2019,64(2):206-211.(QIU Guo-yang, CHEN Zhi-shou, TAN Hua-shun, et al. Experimental research on creep properties of typical silt in region of Wenzhou[J]. Highway, 2019, 64(2): 206 - 211. (in Chinese))
- [4] TOHNO I, IWATA S, SHAMOTO Y. Land subsidence caused by repeated loading[C]// Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1989, Rio DeJaneiro.
- [5] 马剑飞,龚淑云,李向全,等.交通荷载下软土的变形及微结构演化特征[J].深圳大学学报(理工版),2018,35(4):398-404.(MA Jian-fei, GONG Shu-yun, LI Xiang-quan, et al. Deformation and microstructure characteristics of clays under traffic loading[J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2018, 35(4): 398 - 404. (in Chinese))
- [6] 崔兵,王军,丁光亚,等.低路堤软土地基在交通荷载作用下的动力特性试验研究[J].科学技术与工程,2016,16(25):131-136.(CUI Bing, WANG Jun, DING Guang-ya, et al. Model test on dynamic characteristics of low embankment on soft clay foundation under traffic loading[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(25): 131 - 136. (in Chinese))
- [7] HYDE A F L, BROWN S F. The plastic deformation of a silty clay under creep and repeated loading[J]. Géotechnique, 1976, 26(1): 173 - 184.
- [8] MUHANNA A S. A Testing Procedure and A Model for Resilient Modulus and Accumulated Plastic Strain of Cohesive Subgrade Soils[D]. Raleigh: North Carolina State University, 1994.
- [9] 杨少文,巨新昌.盐渍化软土地基处理方法试验研究[J].公路交通科技(应用技术版),2014,10(11):199-201.(YANG Shao-wen, JU Xin-chang. Experimental study on treatment methods of saline soft soil foundation[J]. Highway and Transportation Science and Technology (Applied Technology Edition), 2014, 10(11): 199 - 201. (in Chinese))
- [10] 石照青,刘军勇.盐湖地区盐渍化软土地基沉降监测分析[J].公路工程,2013,38(1):213-218.(SHI Zhao-qing, LIU Jun-yong. Settlement monitoring analysis of salinization weak ground in salt lake area[J]. Highway Engineering, 2013, 38(1): 213 - 218. (in Chinese))
- [11] 赵爱莉,段康进,刘军勇.强夯置换法处理盐渍化软土地基的应用研究[J].公路工程,2012,37(1):133-135, 160.(ZHAO Ai-li, DUAN Kang-jin, LIU Jun-yong. Research of dynamic displacement treating salinization weak ground[J]. Highway Engineering, 2012, 37(1): 133 - 135, 160. (in Chinese))
- [12] 范敏,倪万魁.黄土高原地区公路路基土性参数统计分析[J].地球科学与环境学报,2006,28(2):75-79.(FAN Min, NI Wan-kui. Statistical analysis on loess parameter of highway subgrade in loess plateau area[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2006, 28(2): 75 - 79. (in Chinese))
- [13] 公路试验规程: TJG 3430—2020[S]. 2020. (Highway Test Regulations: TJG 3430—2020[S]. 2020. (in Chinese))

(编校: 孙振远)