

文章编号: 1000-7598(2010)12-3939-06

滨海盐渍土的固化方法及固化土的偏应力-应变

王 沛¹, 王晓燕², 柴寿喜¹

(1. 天津城市建设学院 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384; 2. 中水北方勘测设计研究有限责任公司勘察院, 天津 300222)

摘 要: 滨海盐渍土可使用水泥、石灰、粉煤灰和高分子材料 SH 固土剂单独及联合固化, 以提高土的强度、抗变形能力和水稳性。为研究各种固化方法固化盐渍土的抗变形能力和偏应力-应变特征, 通过三轴 UU 压缩试验得到盐渍土和 6 种固化盐渍土的偏应力-应变曲线。曲线显示: 水泥+石灰类固化土呈应变软化型、石灰+粉煤灰类固化土呈应变软化型、石灰类固化土呈应变硬化型。掺入 SH 固土剂, 提高了固化土的浸水前后的强度, 同时也增强了固化土的水稳性。掺入 SH 固土剂使固化土达到偏应力峰值所需的应变增加, 即抗变形能力增强; 0.9%SH 固土剂+12%石灰+36%粉煤灰固化土具有适中的强度、良好的弹性变形和水稳性的优点, 作为轻质路堤填料使用, 还可减少滨海地区软土路基的沉降量, 这使其成为滨海盐渍土的 6 种固化方案中的最适宜方案。

关 键 词: 滨海盐渍土; 固化土; 偏应力-应变; 三轴压缩试验; 固土材料

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Solidifying methods for inshore saline soil and its deviator stress-strain

WANG Pei¹, WANG Xiao-yan², CHAI Shou-xi¹

(1. Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment, Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300384, China;

2. Institute of Investigation, China Water Resources, Beifang Investigation, Design and Research Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract: Inshore saline soil can be solidified respectively and jointly with cement, lime, flyash and polymer SH agent for increasing the anti-deformation and the strength in air and water of the solidified soils. Triaxial compression test of six solidified soils have been carried out for studying the deviatoric stress-strain properties of the solidified soils. Generally, the deviatoric stress-strain curves of solidified soils with cement and lime and that with lime and flyash are strain softening; that with lime are strain hardening. On the basis of the results of triaxial compression test, SH agent can increase the strength of solidified soil in air and water; furthermore, the strain can be increases at the maximum strength, i.e. anti-deformation and elasticity of solidified soil is enhanced. It has been proved that the solidified soil with 0.9% SH agent and 12% lime and 36% flyash has the well properties, such as lightweight soil, higher strength, and well elasticity, in addition, it can decrease settlement of road foundation because of the lightweight soil.

Key words: inshore saline soil; solidified soil; deviatoric stress-strain; triaxial compression test; solidified material

1 引 言

盐渍土存在盐胀性、溶陷性和腐蚀性等问题。滨海盐渍土为氯盐渍土类型, 因土中含有较多的吸附性钠离子, 还具有土的吸湿软化问题。因此, 工程利用盐渍土时需进行改性或固化处理^[1]。渤海湾西岸地区具有四季温差明显、降水丰沛、地下水位埋藏浅、毛细水上升高度大、下伏地层为饱和软黏土、土的含盐量较高等气候环境与地质特点^[2], 从工程使用的适宜性和价格因素考虑, 宜采用掺入水泥、

石灰、粉煤灰等无机材料的方法进行改性固化, 使固化土具有足够的强度、抗变形能力和水稳性或三者同时具备, 以满足不同类型建设工程的技术要求和气候环境要求^[3]。

前期研究结果证实, 各种无机材料固化滨海盐渍土的土悬液电导率值几乎都不变, 这表明土中的盐份没有参加固化反应, 形成其他化合物, 依旧以盐颗粒或离子的形式存在于土中, 因此, 固化后的土依然会吸湿软化^[4]。为克服无机材料固化土的吸湿软化问题, 又掺入了少量的高分子材料 SH 固土

收稿日期: 2009-04-20

基金项目: 国家自然科学基金课题 (No. 40772166); 天津市高等学校科技发展基金课题 (No. 20090901)。

作者简介: 王沛, 男, 1973 年生, 学士, 高级实验师, 主要从事滨海盐渍土的改性固化方面的研究工作。E-mail: tjwp01@126.com

剂,以提高固化土的强度、抗变形能力和水稳性^[5]。

文献[6]利用三轴压缩试验研究了冻结砂土的应力-应变关系曲线,指出广义的双曲线模型和邓肯-张模型不能很好地反映曲线的特征,因此,提出了与摩尔-库仑强度准则相比,能更好地描述冻结砂土的剪切强度的非线性摩尔强度准则。文献[7]依据三轴压缩试验分析了包括土的类型、围压、初始密度或含水率、排水条件及应力路径等影响土的应力-应变关系转型的因素,提出了按后破坏模量和临界围压两个参数判别土的应力-应变关系转型的方法。文献[8]把岩土材料看作由胶结块和软弱包组成的二元介质,并假定胶结块为弹脆性元,软弱包为硬化型弹塑性元,在非均质材料均匀化理论的基础上,推导了增量型的一般应力-应变关系。模型中包含弹脆性元的破损参数和应力集中系数两组结构参数。鉴于文献[6—8]指出的应力-应变曲线所包含的特征内涵及研究意义,并结合完成的固化盐渍土无侧限抗压强度试验成果,选定固化方法为使用水泥、石灰、粉煤灰和高分子材料 SH 固土剂单独及联合固化滨海盐渍土。按照浸水和未浸水两种状况,完成了盐渍土及 6 种固化土的三轴 UU 压缩试验,研究其偏应力-应变曲线特征。

每种固化土的强度增长规律和应力-应变特征均有所不同,因此,对 6 种固化土的偏应力-应变曲线,按照土的变形—破坏—后期变形的发展阶段进行对比分析,并推荐了最适宜的固化处理方案。

2 制备试样及试验条件

2.1 试验材料和制备试样

滨海盐渍土为塑性指数 15.8 的粉质黏土,含盐量为 2.64%。水泥为 C42.5 的普通硅酸盐水泥;石灰的有效钙镁成分含量为 70%;粉煤灰取自天津军粮城发电厂;SH 固土剂为液体状的改性聚乙烯醇,遇水可无限稀释,固化干燥后不再溶于水,SH 固土剂的固化反应具有不可逆性。

将土料均匀拌和后装入塑料袋中,密闭、静置 1 d,制样前再拌入固化材料。采用内壁涂抹黏稠油脂的钢质模具装填土料,然后使用钢柱上下同时静力挤压土料。待试样成形后静置 3 min,然后用千斤顶将试样缓慢推出,随即放入恒温恒湿养护箱中养护至规定的龄期。前期的无侧限抗压强度试验结果证实,28 d 龄期时各种固化土已形成了绝大部分强度^[9],因此,石灰类固化土和水泥类固化土的三轴压缩试验均选择 28 d 龄期的试样。在到达 28 d 龄期的前 1 d,将试样浸水饱和 24 h,取出后完成浸

水试样的三轴 UU 压缩试验。试样直径为 39.1 mm、高为 80 mm。

2.2 选择固化材料的最优配合比

对每 1 种固化方法均选择 6 个固化材料配合比,对每 1 个配合比均制备 6 个无侧限抗压强度试样,所有固化材料的掺入量均为盐渍土的质量分数。通过比较固化土的无侧限抗压强度值,在每 1 种固化方案的 6 个固化配合比中,选定 1 个最优的固化配合比^[5]。选定的固化方案为:6%水泥+4%石灰固化类,10%石灰固化类,12%石灰+36%粉煤灰固化类。SH 固土剂掺入量均为 0.9%,以此制备试样。

2.3 试验条件

由重型击实试验,获得滨海盐渍土的最大干密度为 1.76 g/cm^3 ,最优含水率为 18%。鉴于静力挤压制样与重型击实制样所提供的能量不同,并考虑到未来的工程应用条件以及石灰和粉煤灰固化材料自身质量较轻的实际情况,决定采用静力挤压法制样,盐渍土、水泥+石灰类固化土和石灰类固化土的干密度为 1.70 g/cm^3 ,12%石灰+36%粉煤灰类固化土的干密度为 1.40 g/cm^3 ,土的含水率均为 18%。

为研究固化土的变形—破坏—后期变形的全阶段的应力-应变规律,在试验中增加试样破坏后的应力-应变数据采集点数。三轴试验的加载速率为 0.4 mm/min ,围压分别为 100、200、300、400 kPa。

3 偏应力-应变曲线特征

3.1 盐渍土

为便于进行固化效果及偏应力-应变特征的对比,首先完成了盐渍土的三轴 UU 压缩试验。浸水前的盐渍土的偏应力-应变曲线如图 1 所示。

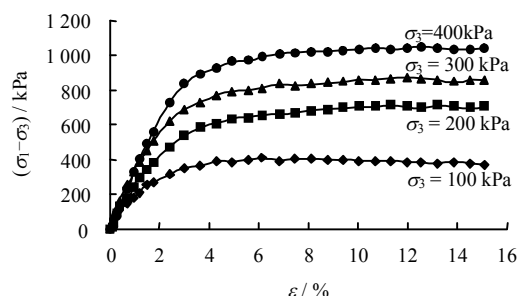


图 1 盐渍土的偏应力-应变曲线(浸水前)
Fig.1 Deviatoric stress-strain curves for man-made saline soil (before saturation)

盐渍土的塑性指数为 15.8,具有一定的塑性。图 1 显示,在 4 种围压下,盐渍土试样的偏应力-应变曲线均没有明显的峰值。偏应力达到较大值后,

随应变的增加, 偏应力基本保持稳定, 曲线呈应变硬化型, 具有一般黏性土的偏应力-应变特征。

3.2 水泥+石灰类固化土

水泥和石灰为工程中常用的无机固化材料, 掺入水泥是为了提高石灰固化土的早期强度和弹性模量。6%水泥+4%石灰固化土的浸水前后的偏应力-应变曲线如图 2 所示。

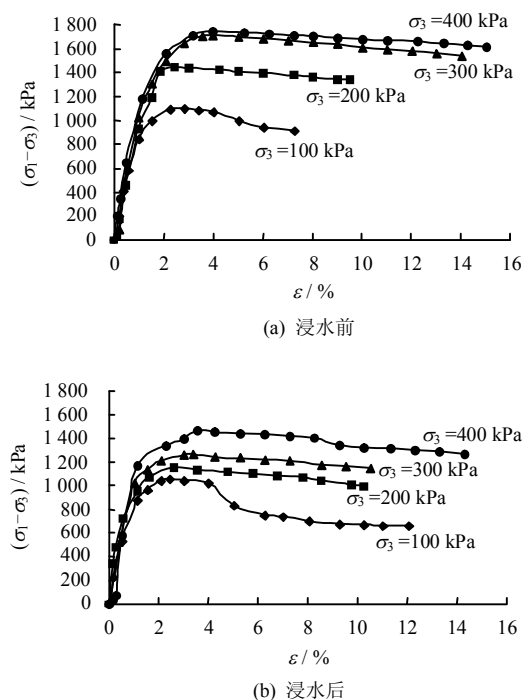


图 2 水泥+石灰固化盐渍土的偏应力-应变曲线
Fig.2 Deviatoric stress-strain curves for solidified saline soil with cement and lime

水泥+石灰固化土浸水前后的偏应力-应变曲线具有峰值点以前呈线性、峰值点以后呈非线性的特征。在低围压下, 曲线显示为应变软化型; 在高围压下, 曲线近乎应变硬化型。图 2 显示, 浸水饱和后的水泥+石灰固化土的强度降低较多, 其水稳性较差, 应用在滨海地区的潮湿环境中将有一定的局限性, 特别是应用在地下水位交替变化带, 易因强度变化过大而引发地基破坏。

为克服上述缺陷, 在固定水泥和石灰掺入量的前提下, 再掺入少量的 SH 固土剂, 以提高固化土的强度, 特别是提高其水稳性。0.9%SH 固土剂+6%水泥+4%石灰固化土的浸水前后的偏应力-应变曲线如图 3 所示。

图 3 表明, 掺入 SH 固土剂, 提高了固化土的强度, 同时也增强了固化土的抗变形能力。与图 2 相比, 在低围压下, 图 3 呈稍明显一些的应变软化特征, 为 SH 固土剂的固化作用所致。

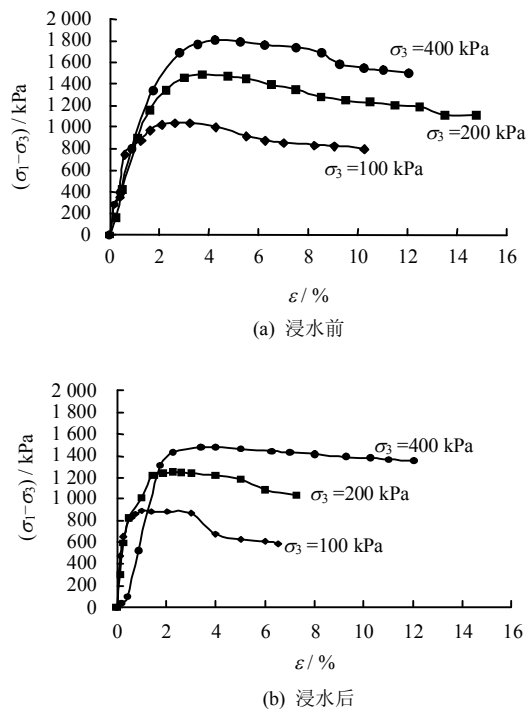


图 3 SH 固土剂+水泥+石灰固化盐渍土的偏应力-应变曲线
Fig.3 Deviatoric stress-strain curves for solidified saline soil with SH agent, cement and lime

浸水前后的固化土的偏应力峰值所对应的平均应变值: 未掺入 SH 固土剂, 由 3.07%变为 2.76%, 降低了 10.1%; 掺入 SH 固土剂, 由 3.55%变为 3.32%, 降低了 6.5%。掺入 SH 固土剂使浸水前后的固化土达到偏应力峰值的应变值增加了, 即弹性性能增强了; 掺入 SH 固土剂使浸水后的固化土达到偏应力峰值所对应的应变值的降低率也减小了, 表明固化土的水稳性提高了。

3.3 石灰类固化土

若将盐渍土填筑在不涉及早期强度的地段, 则仅掺入石灰固化即可。这增强了施工的便捷性, 也避免了盐份对水泥的腐蚀。10%石灰固化土的浸水前后的偏应力-应变曲线如图 4 所示。

与图 2 相比, 石灰固化土浸水后的强度下降得更多, 水稳性更差。

为提高石灰土浸水前后的强度, 在石灰固化的基础上再掺入少量的 SH 固土剂, 以提高石灰固化土的强度和水稳性。0.9%SH 固土剂+10%石灰固化土浸水前后的偏应力-应变曲线如图 5 所示。

对比图 4、5, 与石灰固化土相比, 掺入 SH 固土剂后, 固化土的偏应力峰值有所提高 (见表 1), 应力-应变曲线弹性变形阶段的斜率变小了, 塑性增强, 曲线的应变硬化特征也更为明显。浸水前后固化土的偏应力峰值对应的平均应变值: 未掺入 SH 固土剂, 由 3.68%变为 3.21%, 降低了 12.8%; 掺入

SH 固土剂, 由 4.49% 变为 4.17%, 降低了 7.1%。掺入 SH 固土剂使浸水后固化土的偏应力峰值所对应的应变值的降低率变小, 同时使浸水前后的固化土的偏应力峰值对应的应变值增加了, 即增强了固化土的强度和弹性变形能力。

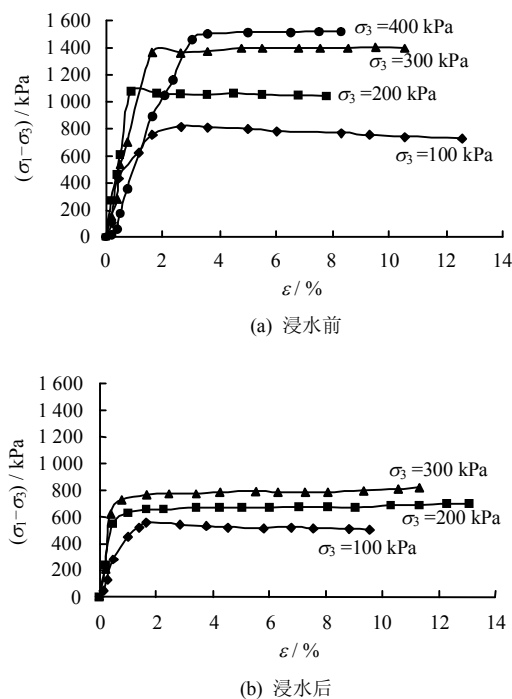


图 4 石灰固化盐渍土的偏应力-应变曲线
Fig.4 Deviatoric stress-strain curves for solidified saline soil with lime

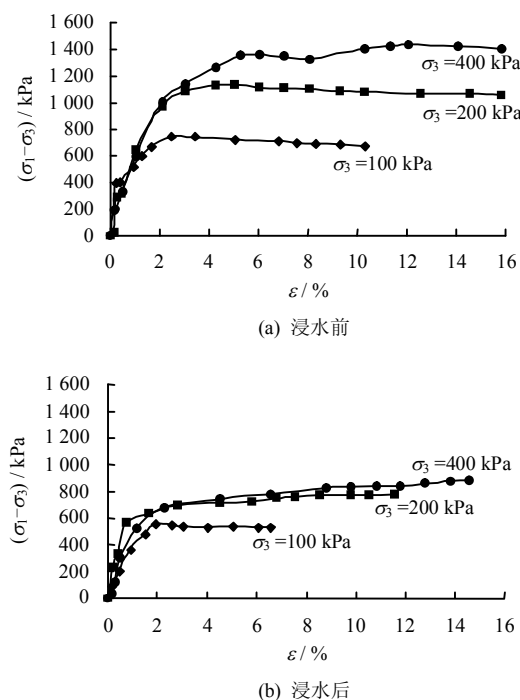


图 5 SH 固土剂+石灰固化盐渍土的偏应力-应变曲线
Fig.5 Deviatoric stress-strain curves for solidified saline soil with SH agent and lime

3.4 石灰+粉煤灰类固化土

选择石灰+粉煤灰固化滨海盐渍土的原因:

(1) 渤海湾西岸地区的地基土为海积软土。因石灰+粉煤灰固化土为轻质土, 应用中可避免使用一般土填筑高路堤所产生的长时间和大数值的沉降问题。

(2) 利用粉煤灰中的部分活性与石灰发生化学反应, 共同固化盐渍土, 拓宽粉煤灰的利用范围。

12% 石灰+36% 粉煤灰固化土的浸水前后的偏应力-应变曲线如图 6 所示。

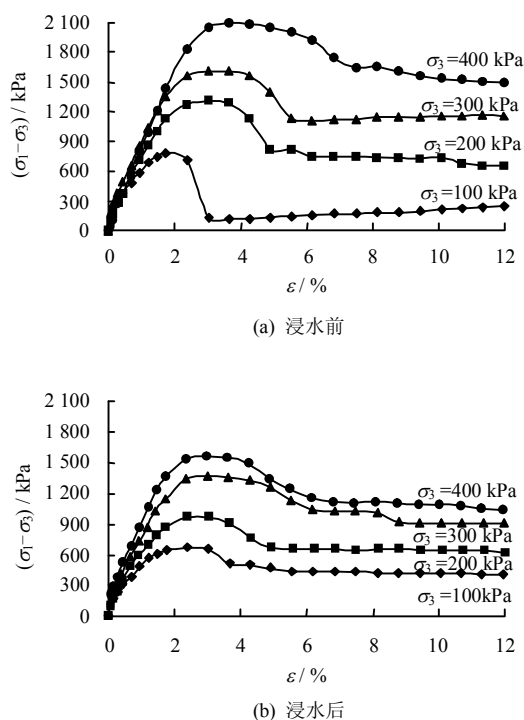


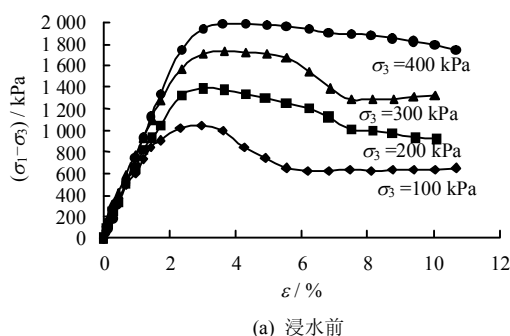
图 6 石灰+粉煤灰固化盐渍土的偏应力-应变曲线
Fig.6 Deviatoric stress-strain curves for solidified saline soil with lime and flyash

由图 6 不难看出, 石灰+粉煤灰固化土的弹性变形阶段的曲线呈缓坡状上升, 与其他固化土的曲线斜率有明显区别。石灰+粉煤灰固化土的偏应力-应变曲线峰值较为明显, 呈应变软化特征。石灰+粉煤灰固化土的残余强度和峰值强度的差值较大, 在低围压下和浸水前, 这种性质在偏应力-应变曲线上显示的最为明显。由于石灰的掺入量高达 12%, 且粉煤灰中尚有部分活性物质, 因此, 其石灰+粉煤灰固化土的浸水前后的强度均高于其他固化土的强度。浸水后的石灰+粉煤灰固化土的强度下降较多, 表明这种固化土的水稳性依旧较差。

鉴于石灰+粉煤灰固化土的水稳性较差, 考虑再掺入少量的 SH 固土剂, 以研究其对增强石灰+

粉煤灰固化土的强度、抗变形能力和水稳性的作用。同时也为研究轻质材料作路堤填料使用的适宜性。0.9% SH 固土剂+12%石灰+36%粉煤灰固化土的浸水前后的偏应力-应变曲线如图 7 所示。

对比图 6、7, 两种固化土的偏应力-应变曲线形态基本相似, 均呈脆性破坏。掺入 SH 固土剂使固化土的浸水前后的弹性变形性能增强了, 各级围压下的偏应力峰值也变大了。峰值后, 曲线变得较为平缓, 残余强度和峰值强度的差值较图 6 变小了。



浸水前后的固化土的偏应力峰值对应的平均应变值为: 未掺入 SH 固土剂, 由 2.85%变为 2.59%, 降低了 9.1%; 掺入 SH 固土剂, 由 3.48%变为 3.32%, 降低了 4.6%。很显然, 掺入 SH 固土剂使固化土的强度、弹性变形性能和水稳性均有所增强。

为评价各种固化方法的固化效果, 优选最适宜的固化方案。将图 2~7 中的 6 种固化土浸水前后和掺入 SH 固土剂前后的偏应力峰值、应变值、及两者的降低率列入表 1。

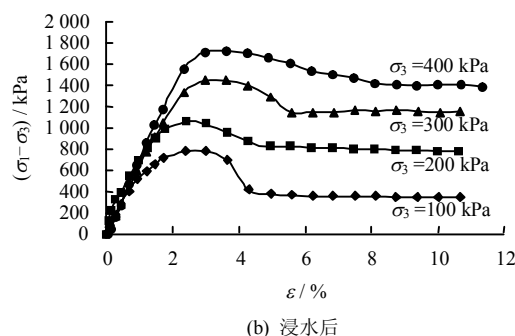


图 7 SH 固土剂+石灰+粉煤灰固化盐渍土的偏应力-应变曲线

Fig.7 Deviatoric stress-strain curves for solidified saline soil with SH agent, lime and flyash

表 1 浸水前后的固化土偏应力峰值和应变值及两者的降低率

Table 1 Maximum deviatoric stresses and corresponding strains and their decrease ratios of solidified saline soils

固化方案	材料	偏应力峰值/kPa		浸水后偏应力峰值的降低率 /%	应变值/%		浸水后应变值的降低率 /%
		未浸水	浸水		未浸水	浸水	
6%水泥+4%石灰	未掺 SH 固土剂	1 443	1 153	20.1	3.07	2.76	10.1
	掺入 SH 固土剂	1 493	1 253	16.1	3.55	3.32	6.5
10%石灰	未掺 SH 固土剂	1 061	657	38.1	1.76	1.63	7.4
	掺入 SH 固土剂	1 124	721	35.9	4.26	4.06	4.7
12%石灰+36%粉煤灰	未掺 SH 固土剂	1 315	969	26.3	2.85	2.59	9.1
	掺入 SH 固土剂	1 384	1 052	24.0	3.48	3.32	4.6

注: 表中的数据均为 200 kPa 围压下的偏应力峰值及应变值; 200 kPa 围压下, 盐渍土的偏应力峰值为 610 kPa, 应变值为 4.28%。

对比分析表 1 中的数据, 得出以下认识:

(1) 虽然 12%石灰+36%粉煤灰固化土的固化材料用量仅比 6%水泥+4%石灰固化土方案的用量增加 2%, 两种固化方案的偏应力峰值所对应的应变值相近, 但前者的强度却增加较多, 说明 12%石灰+36%粉煤灰的固化方案较为优越。

(2) 掺入 SH 固土剂后, 各种固化土的偏应力峰值和所对应的应变值均有所提高, 且浸水后的降低率也低于未掺入 SH 固土剂的固化土。

(3) 掺入 SH 固土剂与否, 石灰固化土的偏应力峰值均最低, 浸水后的偏应力峰值的降低率也最大, 石灰的固化效果最差。

(4) 12%石灰+36%粉煤灰固化土的干密度仅为

1.40 g/cm³, 自身的质量较轻, 但强度较高。再掺入 SH 固土剂固化, 还可提高其水稳性和抗变形能力。

综合考虑固化土的偏应力峰值、抗变形性能和水稳性, 认为 12%石灰+36%粉煤灰固化方法在提高强度和抗变形能力等方面均明显优于 6%水泥+4%石灰固化方法。采用 12%石灰+36%粉煤灰的固化方法, 还可避免一般土路堤对滨海软土产生的长时间和大数值的沉降问题。

4 结 论

(1) 盐渍土的偏应力-应变曲线呈应变硬化型, 具有一般黏性土的偏应力-应变特征; 水泥+石灰类固化土的偏应力-应变曲线呈应变软化型; 石灰+粉

煤灰类固化土的偏应力-应变曲线呈应变软化型;石灰类固化土的偏应力-应变曲线呈应变硬化型。

(2) 掺入 SH 固土剂,使得无机材料固化土浸水前后的强度均增大、偏应力峰值所对应的平均应变值增加、浸水前后的偏应力峰值所对应的平均应变值的降幅变小了。这使得固化土的强度增加、抗变形能力增强及水稳性提高。

(3) 0.9%SH 固土剂+12%石灰+36%粉煤灰固化盐渍土的干密度为 1.40 g/cm^3 ,具有适中的强度、良好弹性性能和水稳性的优点。固化土的自重较轻,适宜填筑滨海软土地基之上的路堤,这样可减少软土路基的沉降时间和沉降量。

参考文献

- [1] 柴寿喜, 杨宝珠, 王晓燕, 等. 渤海湾西岸滨海盐渍土的盐渍化特征分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1217—1221.
CHAI Shou-xi, YANG Bao-zhu, WANG Xiao-yan, et al. Analysis of salinization of saline soil in west coast area of Bohai gulf[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(5): 1217—1221.
- [2] 周琦, 韩文峰, 邓安, 等. 滨海盐渍土作公路路基填料试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1177—1180.
ZHOU Qi, HAN Wen-feng, DENG An, et al. Influences on unconfined compressive strength of stabilized coastal saline soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(9): 1177—1180.
- [3] 柴寿喜, 王沛, 魏丽, 等. 含盐量对滨海盐渍土物理及水理性质的影响[J]. 煤田地质与勘探, 2006, 34(6): 47—50.
CHAI Shou-xi, WANG Pei, WEI Li, et al. Effect of salt content on physical and hydrological properties of saline soil in inshore[J]. **Coal Geology & Exploration**, 2006, 34(6): 47—50.
- [4] 柴寿喜, 王沛, 韩文峰, 等. 高分子材料固化滨海盐渍土的强度与微结构研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1067—1072.
CHAI Shou-xi, WANG Pei, HAN Wen-feng, et al. Research on strength and microstructure feature of solidified saline soil in inshore with polymer[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(6): 1067—1072.
- [5] 柴寿喜. 固化滨海盐渍土的强度特性研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2006.
- [6] 赖远明, 程红彬, 高志华, 等. 冻结砂土的应力-应变关系及非线性摩尔强度准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8): 1612—1617.
LAI Yuan-ming, CHENG Hong-bin, GAO Zhi-hua, et al. Stress-strain relationships and nonlinear Mohr strength criterion of frozen sand clay[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(8): 1612—1617.
- [7] 王成华, 李广信. 土体应力-应变关系转型问题分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 1185—1190.
WANG Cheng-hua, LI Guang-xin. Analysis of problem of pattern transition in stress-strain relations of soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(8): 1185—1190.
- [8] 沈珠江, 刘恩龙, 陈铁林. 岩土二元介质模型的一般应力应变关系[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(5): 489—494.
SHEN Zhu-jiang, LIU En-long, CHEN Tie-lin. Generalized stress-strain relationship of binary medium model for geological materials[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(5): 489—494.
- [10] 谢和平, 周宏伟, 王金安, 等. FLAC在煤矿开采沉陷预测中的应用及对比分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(4): 397—401.
XIE He-ping, ZHOU Hong-wei, WANG Jin-an, et al. Application of FLAC to predict ground surface displacements due to coal extraction and its comparative analysis[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(4): 397—401.
- [11] 周宏伟, 谢和平, 董正亮, 等. 深部软岩巷道喷射钢纤维混凝土支护技术[J]. 工程地质学报, 2001, 9(4): 393—398.
ZHOU Hong-wei, XIE He-ping, DONG Zheng-liang, et al. Support technique of steel fiber shotcrete for soft rock tunnel at great depth[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2001, 9(4): 393—398.
- [12] 徐钟济. 蒙特卡洛方法[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985.

上接第 3938 页