

SY 固化土构件在护坡工程中的性能及其机理研究

张慧莉¹, 廖柯², 石一彤³

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 水利部 新疆水利水电勘测设计研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000; 3. 沈阳晟耀新型建筑材料公司, 辽宁 沈阳 1100003)

摘要: 将SY土壤固化剂和水泥掺入砂壤土,制成不同形状规格的SY固化土护坡构件,分别在水泥含量15%,20%和25%,固化剂掺量为1%,2%,3%和4%时,制成最大干密度的试样,进行了3,7,14和28 d无侧限抗压强度试验,以及水泥含量25%,固化剂掺量3%时的冻融循环试验。结果表明,SY固化剂能显著提高砂壤土的力学性能和抗冻性能;在同一个固化剂掺量下,其力学性能和抗冻性能随着水泥含量的增加而提高;固化剂掺量、水泥含量与土壤含量三者之间存在协调性。SEM测试和机理分析表明,SY土壤固化剂生成的大量二氧化硅凝胶和微膨胀的钙矾石晶体,使内部结构更加致密,从而提高了砂壤土的宏观力学性能和抗冻性能。SY固化土护坡构件完全满足护坡工程质量要求,具有较高的经济、社会和生态价值。

关键词: 护坡构件; SY土壤固化剂; 砂壤土; 工程性能; SEM

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2010)01-0151-05

中图分类号: TU44

Properties and Mechanisms of SY Soil Stabilizer Components in Slope Protection Engineering

ZHANG Huili¹, LIAO Ke², SHI Yitong³

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Xinjiang Survey and Design Institute of Water Resources and Hydropower, Urumqi, Xinjiang 830000, China; 3. Shenyang Shenyao New Material Co., Shenyang, Liaoning 110000, China)

Abstract: Slope protection components made of sandy soil, cement, and a stabilizer named SY were investigated. Unconfined compressive strength and freeze-thaw cycle tests were carried out by samples with maximum dry density. Results present that all the engineering properties of the stabilized soil samples are improved significantly and SY stabilizer, cement, and sandy soil have coordination. From SEM pictures and mechanism analyzes, it can be proved that for sandy soil which has more pores in micro-structure, AFt Crystals, SiO₂ gel, and G-S-H gel fill pores well, which makes the micro-structure denser and the expansion of AFt Crystals. They all benefit macro-engineering properties of stabilized sandy soil. SY solidified soil components satisfy the quality requirements in slope protection engineering and have high economic, social, and ecological values.

Keywords: slope protection component; SY soil stabilizer; sandy soil; engineering property; SEM

随着我国工程建设步伐的加快,水利、公路、铁路等工程中边坡治理成为越来越重要的问题。传统的边坡防护是指采取工程手段对边坡进行加固,防止或减轻边坡对邻近建筑物有危害的变形和位移,如滑坡、泥石流等失稳情况^[1]。各种边坡治理技术水平也逐渐发展,从传统的植物护坡、边坡防护网、砌石护坡(干砌、浆砌、抛石)、喷涂、挡土墙等到生态护坡。其中,由于混凝土、石料等材料易得且便于做精确的力

学分析,人们往往采取石料或混凝土砌筑挡土墙和护面^[2]。

我国的砂壤土分布较广,以新疆为最^[3]。利用砂壤土为原料,加入SY土壤固化剂和少量水泥,制成形状、尺寸各异的护坡构件,有变废为宝,就地取材,价格低廉等优点,在缺少砂石或工程造价受限制的地区,可代替传统的石料或混凝土,将大大降低护坡工程造价,具有广泛的使用前景。

收稿日期: 2009-06-22

修回日期: 2009-07-26

资助项目: 陕西省自然科学基金资助项目(SJ08E111); 2007西北农林科技大学人才基金资助(011404)

作者简介: 张慧莉(1969—),女(汉族),河南省淅川县人,博士生,副教授,主要从事建筑材料方面的教学与研究工作。E-mail: huilizhang163@163.com。

通信作者: 廖柯(1974—),男(汉族),陕西省汉中市人,工程师,主要从事水利水电工程设计及新材料应用研究。E-mail: LZZ05813@126.com。

同一种固化剂对不同的固结对象,即不同类型的土壤具有不同的固化效果。不同的土壤固化剂对同一种土壤也有不同的加固效果。黄新等^[4]对含铝固化剂加固软土的试验研究发现,使用普通硅酸盐水泥+石膏+含铝固化剂对武汉市天然土和北京市天然土都能取得较好的加固效果。用普通硅酸盐水泥+石膏加固武汉市天然土可获得显著地增强效果,但加固北京市天然土时强度反而不如单独用普通硅酸盐水泥的水泥土。樊恒辉等^[5]选用 MBER 土壤固化剂对渭河Ⅱ级阶地的黏壤土加固制成固化土集流面用于雨水集蓄工程,其使用效果良好。戴文亭^[6]等采用美国 Base-Seal 固化剂对长春地区典型黏性土进行了加固,固化土早期强度和回弹模量高,抗弯拉性能、冻稳定性、水稳定性、抗渗性能适合在长春地区及其气候、土质相似地区的道路工程中使用,其 28 d 无侧限抗压强度达到 2.24 MPa。方祥位^[7]等用 GT 土壤固化剂对北京软土进行的加固试验研究发现,GT 型土壤固化剂与石灰改良土相比,最大干密度大而最优含水量小,抗剪强度高,压缩性低,抗渗透性好。以往对黏土的研究发现,固化后的黏土普遍存在强度低,抗渗能力差和抗冻性差等问题,满足不了工程耐久性的要求。除了固化土的配比,固化土的施工工艺对其后期力学性能有很大影响。

本研究于 2008 年 10 月至 2009 年 3 月期间用 SY 固化剂对山西省文水县砂壤土固结后试样的力学性能、抗冻性能进行了测试,并分析了其机理,以探讨其作为护坡构件应用于边坡治理工程中的可行性。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

(1) SY 土壤固化剂:已申请了国家发明专利,其主要成分为:铝酸钙 30%~50%,二氧化硅 30%~40%,二价铁类原料 10%~20%,熟石膏 5%~9%,固体水玻璃 5%~8%,氟硅酸钠 0.5%~1%。

(2) 吉港普通硅酸盐水泥 42.5。

(3) 文水县砂壤土。

1.2 试验配比设计

在以往试验研究的基础上,本试验选择 4 个固化剂(1%,2%,3%,4%)掺量,3 个水泥掺量(15%,20%,25%)。其中固化剂掺量是固化剂质量占水泥+砂壤土质量的百分数,水泥掺量是指水泥质量占水泥+砂壤土质量的百分数,砂壤土含量是指砂壤土质量占水泥+砂壤土的百分比。每个水泥含量以 1 组固化剂空白设计作为对比。具体的实验设计见表 1。

表 1 实验设计

编号	固化剂掺量/%	水泥含量/%	砂壤土含量/%
A ₀	0	15	85
A ₁	1	15	85
A ₂	2	15	85
A ₃	3	15	85
A ₄	4	15	85
B ₀	0	20	80
B ₁	1	20	80
B ₂	2	20	80
B ₃	3	20	80
B ₄	4	20	80
C ₀	0	25	75
C ₁	1	25	75
C ₂	2	25	75
C ₃	3	25	75
C ₄	4	25	75

1.3 试验内容

1.3.1 击实试验 将固化剂、水泥、砂壤土按表 1 配比,根据经验加适量的水,将 4 种原料搅拌均匀后分 3 层装入击实仪,每层击实数为 25 击。

1.3.2 试样制备 以击实试验结果作为掺配水量的依据,在实验室标准环境下,采用微型鼓状混凝土搅拌机,严格按照以下程序进行。

(1) 先投放水泥和 SY 固化剂,搅拌 90 s。

(2) 加入砂壤土,搅拌 3 min。

(3) 加入 50% 的水,搅拌 2 min,停止 1 min,停止期间用塑料薄膜将搅拌机口盖严,以免水分散失。

(4) 加入残余的 50% 水,开动搅拌机搅拌 2 min。

(5) 将搅拌好的土料装入配套膜具中,在 100 t 压力机上制成 $\Phi 100$ mm \times 100 mm 的圆柱形试样,压实度为 98%。每组试验有 15 个试样。

1.3.3 无侧限抗压强度 每组 12 个试样分别在龄期 3,7,14,28 d 按照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》^[8]测试无侧限抗压强度。每组试样为 3 个,以 3 个试样测值的算术平均值为该组试件的试验结果。当 3 个测值的最大值或最小值之一,与中间值的差超过中间值的 15% 时,取中间值。如两个测值与中间值之差均超过中间值的 15%,则此组试验结果无效。重新补做试件直到满足以上要求。

1.2.4 冻融循环试验 对以上试验结果进行分析比较,从中选出最优配比,以此最优配比原材料成型 $\Phi 100$ mm \times 100 mm 的圆柱型试样 30 个进行冻融循环试验。由于现有规范中没有固化土冻融循环的试验方

法,参照混凝土冻融循环试验方法:试件养生至 28 d 后放入混凝土冻融机,在 (-20 ± 2) °C 温度下冻 4 h,在 (20 ± 2) °C 温度下融 4 h,分别经过 5 次,10 次,15 次,20 次,25 次,30 次,35 次,40 次,45 次,50 次冻融循环后,测试试样冻后无侧限抗压强度和强度损失率。

2 试验结果和分析

2.1 干密度和最优含水量

每个配比的固化土在击实试验时,通过改变含水量可得到一系列干密度。如果以含水量为横坐标,干密度为纵坐标,则含水量与干密度的关系曲线基本呈抛物线状,在抛物线的最高点即最大干密度的那一点所对应的含水量是最优含水量。通过最优含水量配制出来的固化土样最密实,后来制作的试样都在最密实状态下配制,有利于结果之间的对比,保证了试样的正确性和稳定性。通过击实试验,得到以上 15 个配比的干密度和最优含水量(见表 2)。

表 2 最大干密度和最优含水量

编号	最大干密度/($g \cdot cm^{-3}$)	最优含水量/%
A ₀	1.86	12.8
A ₁	1.90	12.9
A ₂	1.91	12.8
A ₃	1.92	12.8
A ₄	1.91	12.8
B ₀	1.95	12.7
B ₁	1.95	12.9
B ₂	1.97	12.7
B ₃	2.01	13.0
B ₄	2.04	13.1
C ₀	2.12	14.1
C ₁	2.15	14.2
C ₂	2.19	14.3
C ₃	2.21	14.4
C ₄	2.23	14.4

2.2 无侧限抗压强度

图 1—3 分别为水泥含量为 15%, 20%, 25% 的试样无侧限抗压强度曲线。可以看出,所有的试样的无侧限抗压强度随着龄期延长而增加,在同一个固化剂掺量下,无侧限抗压强度随着水泥含量的增加而提高。没有掺加固化剂的水泥土在整个水化过程中强度增长缓慢,对于 15%, 20%, 25% 的水泥土,7 d 的强度分别只达到 28 d 强度的 48%, 47%, 45%。掺加固化剂的固化土试样,其前期强度增长较快,7 d 的强度全部达到 28 d 强度的 70% 以上。掺加固化剂可大幅提高试样的 28 d 侧限抗压强度:对于 15% 水泥

含量的固化土,相对于不掺固化剂的对照组,1%, 2%, 3%, 4% 固化剂掺量的试样,28 d 抗压强度分别提高了 82%, 108%, 118%, 154%;对于 20% 水泥含量的固化土,相对于不掺固化剂的对照组,1%, 2%, 3%, 4% 固化剂掺量的试样,2 d 抗压强度分别提高了 19%, 68%, 107%, 182%;对于 25% 水泥含量的固化土,相对于不掺固化剂的对照组,1%, 2%, 3%, 4% 固化剂掺量的试样,28 d 抗压强度分别提高了 25%, 114%, 206%, 30%;其中,25% 水泥,3% 固化剂的配比获得了最高的无侧限抗压强度值 17.68 MPa。

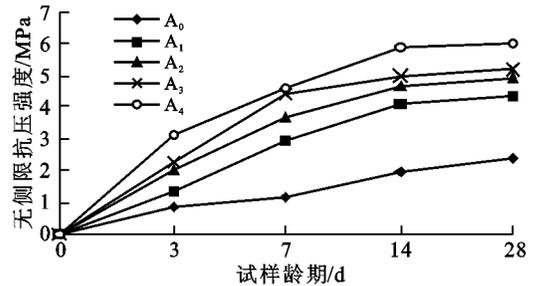


图 1 15% 水泥含量的固化土试样无侧限抗压强度

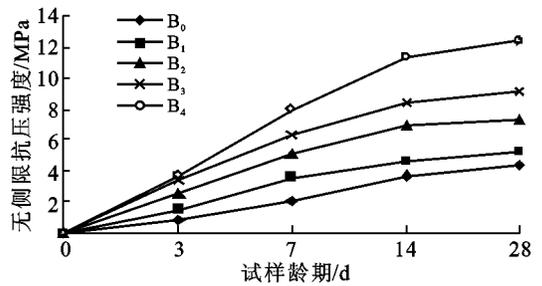


图 2 20% 水泥含量的固化土试样无侧限抗压强度

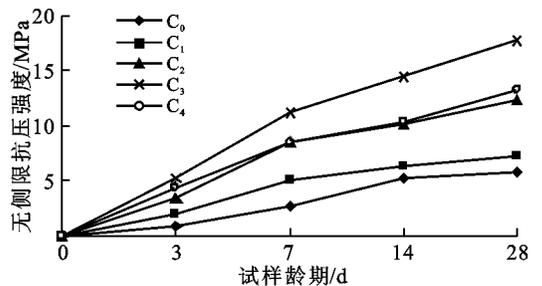


图 3 25% 水泥含量的固化土试样无侧限抗压强度

2.3 冻融循环

采用最优配比为 25% 水泥, 3% 固化剂的试样进行冻融循环试验。此组试样冻前强度 17.68 MPa。冻融循环试验结果如表 3 所示。表 3 中数据显示,强度损失率随着冻融循环次数增加而增加。相对于前一级冻融循环次数,在最初的 5 次和第 30 次冻融循环过程中,强度损失率较大,均超过 13%,其余的各级,强度损失率呈较缓的趋势递减。

表3 冻融循环试验结果

冻融次数	冻后强度/MPa	强度损失率/%
5	15.32	13.30
10	13.57	23.20
15	12.98	26.54
20	11.67	33.95
25	10.22	42.16
30	6.13	65.31
35	5.59	68.36
40	5.08	71.25
45	4.55	74.25
50	3.27	81.49

3 机理分析

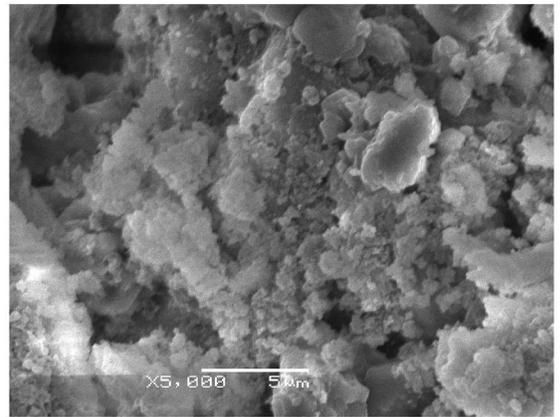
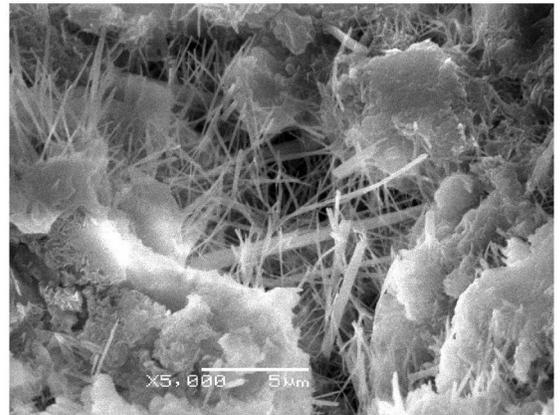
水泥水化过程中产生的水化硅酸钙 C—S—H 是水泥强度的最大贡献者,决定了水泥土的强度。掺入 SY 固化剂后,固化剂中铝酸钙、石膏与水反应速度极快,生成大量钙矾石 AFt, AFt 呈针状晶体,具有极佳的水硬性,与尚未结晶的 C—S—H 凝胶一起提高土壤的固结强度而且产生很大的体积膨胀,填充于孔隙和空隙中起到提高密实度,提高强度的作用。在生成 AFt 晶体的过程中,将伴随产生较大的体积膨胀,抵消了 C—S—H 凝胶过程中产生的体积收缩,是在 C₃S 完全硬化之后形成,则将产生体积膨胀,膨胀的体积如果没有多余的空间,将破坏水化硅酸钙结构,对强度起到减少作用。如果 AFt 是在 C₃S 完全硬化之前或浆体获得强度之前形成,则将对水泥浆早期强度发展做出贡献,而膨胀效应不占主导地位^[9]。

本研究中土壤为砂壤土,颗粒相对于黏土而言较大,所以土体中,空隙率较大,钙矾石的填充作用和膨胀作用对砂壤土而言,一般情况下有利于提高固化土体密实度,有利于强度和抗冻性能的提高。

图4和图5分别是25%水泥含量,固化剂空白样和固化剂掺量为3%试样养护28d时放大5000倍的扫描电镜照片。图4为水泥加入砂壤土和水,发生水化反应,生成大量无定型结晶水化物,如水化硅酸钙、水化硅酸二钙、水化铝酸三钙、以及少量的水化铝酸四钙以及无定型胶凝体和氢氧化钙。这些结晶水化物和胶凝体都具有一定的强度,充填于空隙中或以胶结物形式存在于空隙中。这些结晶水化物和胶凝体有利于提高加固体的强度。

从图5可以看到,加入固化剂后,立即生成大量细密的针状钙矾石晶体,与不规则的 C—S—H 凝胶体相互交织,把土壤颗粒紧紧包裹,使微观结构致密,加之,

钙矾石晶体微膨胀,进一步填充了空隙,内部结构变得更加致密,使宏观力学性能和抗冻性能大大提高。

图4 试样 C₀ 28 d 龄期电镜扫描图图5 试样 C₃ 28 d 龄期电镜扫描图

SY 固化剂含有一定量的硅酸钠,加入氟硅酸钠后,促进二氧化硅凝胶迅速析出,进一步包裹土粒并填充其孔隙,有助于提高土体的强度和抗冻性。

SY 固化剂水化反应后生成的钙矾石、二氧化硅凝胶和水泥早期形成的水化铝酸三钙、水化硅酸二钙、水化硫铝酸钙等可作为后续反应晶体的生长核,可加快浆液中的各种水化反应,生成更多的具有一定的强度的水化晶体和胶凝体,使胶凝速度加快,时间缩短,使固化土体强度快速增长。

当水泥含量为25%时,固化剂掺量在3%时的力学指标高于4%时的力学指标,这意味着并非固化剂掺得越多,固结土体就越密实。固化剂、水泥、土壤三者存在协调性:对于本研究中的砂壤土,当固化剂含量为4%时,产生了较多的 C—S—H,4% 固化剂产生大量的钙矾石具有膨胀性,没有足够的发展空间,从而破坏了一些 C—S—H 结构,相对于固化剂3%的试样,无侧限抗压强度下降,抗冻能力下降。

由于砂壤土颗粒坚固性比黏土颗粒高,砂壤土的

液、塑限较黏土低,在搅拌过程中颗粒之间不相互粘结。本试验研究中延长了搅拌时间,且采用了特殊的搅拌过程,原料之间搅拌均匀,保证水化反应充分发生,这也是获得较高的固化土体强度的重要因素之一。

护坡构件在公路、铁路工程边坡中,主要承受构件之间的压应力,护坡基础沉降变形形成的拉应力,风荷载以及冬季冻胀应力等,所以应具有一定的强度以及抗冻能力,本研究设计的最优配比的 SY 固化土构件,其强度值超过 15 MPa,冻融 25 次后残余强度超过 10 MPa,可远远满足我国大部分地区的护坡工程要求。

目前,我国尚无相应的护坡构件质量评定标准,当 SY 固化土构件应用于水利工程护坡时,可参照中华人民共和国水利部行业规范 SL18-2004《渠道防渗工程技术规范》^[10],对于干硬性水泥砂土,干密度应不小于 1.8 g/cm^3 ,对于塑性水泥砂土,干密度应不小于 1.8 g/cm^3 。本研究中干密度最小值为 1.87 g/cm^3 ,满足渠道护坡工程要求。对于常年输水的干硬性水泥土,28 d 抗压强度应不小于 2.5 MPa,季节性输水的干硬性水泥土,28 d 抗压强度应不小于 4.5 MPa。对于常年输水的塑性水泥土,28 d 抗压强度应不小于 2.0 MPa,季节性输水的塑性水泥土,28 d 抗压强度应不小于 3.5 MPa。本研究中当水泥含量为 10%,15% 时,固化剂掺量应大于 1.0% 才能满足抗压强度要求;当水泥含量为 20% 时,固化剂掺量大于 0.5% 就能满足抗压强度要求。按照规范,气候温和地区水泥土抗冻等级不宜低于 F₁₂,本研究采用最优配比的试样在冻融 45 次,残余强度 MPa 尚大于 4.5 MPa,满足规范要求。

以上试验结果与分析表明,SY 固化剂在固化砂壤土方面取得了较为理想的结果,在满足密实度要求的情况下,可做成预制构件应用于护坡工程中。文峪水库管理局 2008 年冬季采用机械成型 SY 固化土预制块,并进行蒸汽养护,进行了 3 km 坡比为 1:1.5 的干渠护坡的防渗衬砌铺设,其强度和抗冻、抗渗性完全满足工程要求,比同期制成的混凝土预制构件结构密实,价格只有混凝土预制构件的 1/2,节约了砂、石、水泥,取得了较好的社会、经济和生态效益。SY 固化剂可用于河床、堤坝、公路铁路护坡,风沙防护植草网格等水土保持工程中,具有广阔的应用前景。

4 结论

本研究采用 SY 土壤固化剂,以砂壤土为固结对象,在水泥含量为 15%,20% 和 25%,固化剂掺量为 1%,2%,3% 和 4% 时进行了 3,7,4,28 d 无侧限抗压

强度试验,以及水泥含量 20% 时,25% 固化剂掺量时的冻融循环试验,并进行了 SEM 测试和分析,得出以下结论。

(1) 无侧限抗压强度随着龄期延长而增加,在同一个固化剂掺量下,无侧限抗压强度随着水泥含量的增加而提高。没有掺加固化剂的水泥土在整个水化过程中强度增长缓慢;掺加固化剂的固化土试样,其前期强度增长较快,掺加固化剂可大幅提高试样的 28 d 无侧限抗压强度。

(2) 强度损失率随着冻融循环次数增加而增加。相对于前一级冻融循环次数,在最初的 5 次和第 30 次冻融循环过程中,强度损失率较大,其余的各级,强度损失率呈较缓的趋势递减。

(3) 掺入 SY 固化剂后,生成大量水硬性钙矾石 AFt 和 SiO₂ 凝胶,与水泥水化反应生成的 C—S—H 凝胶一起提高土壤的固结强度而且产生很大的体积膨胀,填充于砂壤土孔隙和空隙中,起到提高密实度,提高强度和抗冻性能的作用。

(4) 固化剂、水泥、土壤三者存在协调性。SY 土壤固化剂使加固砂壤土获得了优良的性能。采用适宜配比完全可以满足水土保持工程护坡的技术要求,在我国砂壤土地区,能变废为宝,大幅降低护坡构件造价,节约砂石料等天然资源,具有较高的经济、社会、生态价值。

[参 考 文 献]

- [1] 叶建军. 边坡生态防护工程中的若干问题探讨[J]. 水土保持研究, 2007, 14(5): 333-335.
- [2] 党福江, 张富, 高国胜, 等. 巢形装配式混凝土生态护坡构件设计[J]. 中国水土保持, 2008(5): 37-38.
- [3] 阿不来提·马木提. 加快农村能源转换 改善新疆生态环境[J]. 新疆人大, 2003(6): 19-20.
- [4] 黄新, 许晟, 宁建国. 含铝固化剂固化软土的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 156-161.
- [5] 樊恒辉, 高建恩, 吴普特, 等. 土壤固化剂集流面不同施工工艺比较[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 73-77.
- [6] 戴文亭, 陈瑶, 陈星. BS-100 型土壤固化剂在季冻区的路用性能试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2257-2261.
- [7] 方祥位, 孙树国, 陈正汉, 等. GT 型土壤固化剂改良土的工程特性研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1545-1548.
- [8] 中华人民共和国交通部. JT J057-94 公路工程无机结构材料稳定材料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 1996.
- [9] 李亚杰, 方坤河. 建筑材料[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 45-46.
- [10] 中华人民共和国水利部. SL18-2004 渠道防渗工程技术规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.