

某一级公路路基填土膨胀性试验

郭军辉¹, 阎长虹¹, 夏良斌², 王新明³, 郑 军¹, 梁清雨¹

(1. 南京大学 地球科学系, 江苏 南京 210093; 2. 东盟营造工程有限公司,
陕西 西安 710075; 3. 苏州公路建设指挥部, 江苏 苏州 215007)

摘要: 通过对某一级公路路基填土的天然含水量、液限、塑限、颗粒组成、矿物成分、自由膨胀率、胀缩总率等试验研究, 运用塑性图, 并综合各项指标对路基填土的膨胀性做了评价。结果认为, 此路基填土为高液限和塑限的淤泥质软土, 天然状态下具有弱膨胀性。通过对路基填土的击实试验和承载比试验表明, 填土压实之后具有一定的膨胀性, 在含水量变化差异性影响下的胀缩变形可能导致路基开裂。

关键词: 淤泥质软土; 填土; 膨胀性评价; 路基

中图分类号: P642.13; TU443 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2007)01-0085-05

Experimental Study on Swelling Property of Subgrade Soil in a First Class Highway

GUO Jun hui¹, YAN Chang hong¹, XIA Liang bin²,
WANG Xin ming³, ZHENG Jun¹, LIANG Qing yu¹

(1. Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China;
2. Eastern Alliance Construction Engineering Limited Company, Xi'an 710075, Shaanxi, China;
3. Suzhou Highway Construction Headquarters, Suzhou 215007, Jiangsu, China)

Abstract Based on the experimental study on water contents, liquid limit, plastic limit, particle composition, mineral content, free expansive ratio and swell shrink total ratio of the filled soil in a first class highway, this paper evaluates the property of the subgrade soil by using the plasticity chart and considering various indices. It is concluded that the filled soil is silt soil with high liquid limit and plastic limit, which has the low swelling property in natural state. According to the results of the compaction test and bearing ratio test, it is discovered that the filled soil also has the swelling property after being compressed, which may result in the crack of the subgrade with the change of the water contents.

Key words: silt soil; filled soil; swelling property evaluation; subgrade

0 引言

公路路基是公路工程的重要组成部分, 其填土必须具有足够的强度和水稳定性。但在施工时, 很少有人对淤泥质软土填土的膨胀性进行评价。如对此类特殊土的膨胀性认识不足或不能准确判断, 把它当作正常填土使用, 将导致路基发生开

裂、坍塌等病害。如将其全部废弃不用, 又会造成大量的废方和借方, 增加了工程投资。淤泥质软土经压实后可形成人工压实膨胀土, 它与原状膨胀土的性质有所不同, 由于在压实过程中的结构再排列, 可使得其膨胀性比原状土大几倍甚至更多^[1-3]。针对这一情况, 结合具体公路工程, 对淤泥质软土填土做了详细地试验研究, 对其膨胀性形成了较为

收稿日期: 2006 03 30

基金项目: 江苏省苏州高速公路指挥部项目(NJU2005-1-23)

作者简介: 郭军辉(1979), 男, 陕西宝鸡人, 硕士研究生, 从事城市环境岩土工程研究。E-mail: gjhfath@163.com

准确地认识。

1 工程概况

该一级公路位于江苏省内, 全线长约 42 km, 地处阳澄湖东北方向的沼、湖积平原, 属亚热带湿润气候区, 四季分明, 雨量充沛, 年平均气温 17 ℃, 全年降水量 1 284. 4 mm。由于工程需要大量的填土, 首先考虑沿线就地取土, 但全线可用的取土场, 地质情况较差, 全部属于 II 类软土。软土层厚 10 ~ 30 m, 主要分布在原地面以下 5 ~ 15 m 和 10 ~ 30 m 的浅层和深层, 地表 0 ~ 3 m 处广泛分布淤泥质粘土(图 1)。为考察此类土作为路基填土的适宜性, 对填土的膨胀性做出正确评价至关重要。

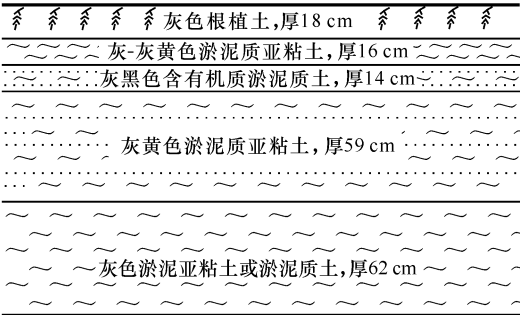


图 1 路基填土取土坑地层剖面

Fig. 1 Soil Profile Characteristics of the Subgrade Borrow Pit

2 填土膨胀性试验研究

为准确评价填土的膨胀性, 对现场进行了地质调查与取样, 分别从填土的天然含水量、重度、密度、液限、塑限、矿物成分、颗粒组成、自由膨胀率、胀缩总率和易溶盐、击实及承载比等方面考察决定膨胀性的各项因素, 再进行综合评价。

2.1 现场原状土试验

2005 年 4 月 20 日, 对沿线的 3 个取土场 1-1、2-2、2-3 逐一进行了踏勘。取土场土层分布见图 1。从现场踏勘土层剖面和施工开挖来看, 各层土特性变化不大, 除表层为灰色、灰黑色的腐殖土(18 ~ 60 cm)外, 下层为灰黄色淤泥质土。每个取土场按土的分层情况取代表性土样 4 ~ 5 个, 取样均在地下水位以上。对原状土进行了含水率、重度等试验, 其结果见表 1。

由表 1 可知, 土层的天然含水率均比较大, 为 31. 9% ~ 48. 98%, 其中有 4 个土样大于 40%, 层厚占总体厚度的 71%。湿重度偏低, 为 16. 93 ~ 18. 33 kN/m³。相对密度整体较高, 为 2. 72 ~ 2. 78, 说明土

表 1 现场各试验结果及液限、塑限

Tab. 1 Results of Field Experiments Liquid and Plastic Limit

| 试样编号 | 含水率/% | 重度/(kN · m ⁻³) | 相对密度 | 孔隙比 |
|-------|--------|----------------------------|-------|--------|
| 1-1 ② | 48. 98 | 16. 93 | 2. 76 | 1. 379 |
| 1-1 ③ | 34. 14 | 17. 83 | 2. 75 | 1. 022 |
| 1-1 ④ | 34. 64 | 17. 93 | 2. 75 | 1. 022 |
| 1-1 ⑤ | 42. 55 | — | 2. 78 | — |
| 2-2 ① | 30. 07 | 18. 13 | 2. 72 | 0. 916 |
| 2-2 ② | 32. 96 | 17. 93 | 2. 76 | 1. 003 |
| 2-2 ③ | 40. 68 | 17. 44 | 2. 75 | 1. 178 |
| 2-2 ④ | 41. 03 | 17. 25 | 2. 74 | 1. 191 |
| 2-3 ② | 31. 90 | 18. 13 | 2. 73 | 0. 950 |
| 2-3 ③ | 32. 40 | 18. 13 | 2. 74 | 0. 957 |
| 2-3 ④ | 32. 68 | 18. 33 | 2. 73 | 0. 937 |
| 2-3 ⑤ | 40. 43 | 17. 15 | 2. 76 | 1. 220 |
| 试样编号 | 液限/% | 塑限/% | 塑性指数 | 液性指数 |
| 1-1 ② | 54. 39 | 34. 66 | 19. 7 | 0. 726 |
| 1-1 ③ | 44. 79 | 23. 55 | 21. 2 | 0. 499 |
| 1-1 ④ | 44. 79 | 23. 55 | 21. 2 | 0. 499 |
| 1-1 ⑤ | 48. 13 | 22. 45 | 25. 7 | 0. 783 |
| 2-2 ① | 41. 30 | 21. 27 | 20. 0 | 0. 439 |
| 2-2 ② | 50. 43 | 20. 22 | 30. 2 | 0. 422 |
| 2-2 ③ | 53. 46 | 23. 51 | 30. 0 | 1. 358 |
| 2-2 ④ | 58. 82 | 22. 00 | 36. 8 | 0. 517 |
| 2-3 ② | 50. 40 | 21. 87 | 28. 5 | 0. 352 |
| 2-3 ③ | 48. 51 | 23. 71 | 24. 8 | 0. 350 |
| 2-3 ④ | 37. 79 | 21. 12 | 16. 7 | 0. 693 |
| 2-3 ⑤ | 50. 75 | 25. 63 | 25. 1 | 0. 589 |

中粘土颗粒含量较高。孔隙比为 0. 916 ~ 1. 379。从现场勘察及测试结果看, 天然含水率高, 重度偏低, 孔隙比、密度较大, 总体认为属淤泥质软土。

2.2 填土液限、塑限测定

土的界限含水量是反映土粒与水相互作用的灵敏度指标之一, 在一定程度上反映了土的亲水特性。它与土的颗粒组成、粘土矿物成分、阳离子交换性能、土的分散度和比表面积以及水溶液的性质等有密切的关系^[3]。因此, 依据《公路土工试验规程》(JTJ051-93)^[4], 采用 LP 100 型液限、塑限联合测定仪对各土样的液限、塑限进行测定, 测试结果见表 1。

一般来说, 膨胀土具有高塑性, 液限越高, 则土的膨胀潜势就越大^[3]。试验结果表明, 各土样的液限整体大于 37%, 最高达 58.82%。塑限也较高, 均大于 21%, 塑性指数均在 20 左右, 最高达 36.8。液性指数 0.35~1.35。此外, 土样 2 2 ③ 的液性指数大于 1, 说明该土样已处于流动状态, 据规范^[5], 其具有膨胀土液限、塑限的指标特征。

2.3 填土颗粒分析试验

粒度组成是反映土物质组成的基本特性指标。土中粒度小于 0.005 mm 的粘粒与小于 0.002 mm 的胶粒成分的含量越高, 表明蒙脱石成分较高, 分散性较好, 比表面积大, 亲水性强, 膨胀性越大。所以采用土的粘粒含量指标也可以区分膨胀土与非膨胀土^[6]。依据文献[4]采用筛分法和密度计法对各土样进行粒度分析, 试验结果见表 2。

表 2 颗粒分析结果

| Tab. 2 Results of the Particle Analysis | | | | | | % |
|---|-------|--------|---------|--------|---------|---------|
| 土样 编号 | 粒度/mm | | | | | |
| | < 2 | < 0.25 | < 0.074 | < 0.05 | < 0.005 | < 0.002 |
| 1 1 ② | 100 | 97.90 | 97.80 | 90.86 | 38.75 | 27.40 |
| 1 1 ④ | 100 | 98.50 | 97.64 | 97.57 | 45.36 | 35.72 |
| 1 1 ⑤ | 100 | 98.09 | 97.15 | 93.73 | 41.84 | 29.87 |
| 2 2 ① | 100 | 98.90 | 94.25 | 89.96 | 34.15 | 29.94 |
| 2 2 ② | 100 | 99.20 | 97.46 | 97.37 | 46.90 | 31.30 |
| 2 2 ③ | 100 | 98.85 | 98.15 | 97.57 | 56.78 | 38.56 |
| 2 2 ④ | 100 | 99.30 | 97.34 | 96.14 | 47.09 | 30.89 |
| 2 3 ② | 100 | 98.96 | 98.01 | 97.97 | 48.82 | 34.29 |
| 2 3 ③ | 100 | 99.30 | 97.82 | 96.14 | 38.91 | 24.17 |
| 2 3 ④ | 100 | 99.30 | 98.02 | 97.97 | 43.91 | 28.80 |
| 2 3 ⑤ | 100 | 98.90 | 96.84 | 87.60 | 38.75 | 28.71 |

土样颗粒分析结果显示, 各土样粒度小于 0.005 mm 的粘粒质量分数较高, 大于 38%, 粒度小于 0.002 mm 的胶粒质量分数也较高, 在 30% 左右, 最高达 38.56%。这说明工程填土具有比一般土更大的活动性, 土颗粒与水分子的作用强烈, 一旦含水量有所变化, 将导致膨胀土的胀缩性发生很大变化。

2.4 填土矿物成分分析

粘土矿物成分是决定膨胀土工程特性的主要内在因素。已有的研究成果表明^[6 11], 在膨胀土的粘土矿物中几乎都含有蒙脱石矿物, 有的以蒙脱石为主, 有的以蒙脱石-伊利石为主, 有的则以伊利石

为主, 含蒙脱石。蒙脱石是最典型地强亲水性矿物, 伊利石则具有一定的亲水性。这两类粘土矿物都具有膨胀的微结构, 吸水后体积会发生膨胀, 失水后则收缩, 所以当土中含有蒙脱石、伊利石的有效成分, 且达到一定数量时, 这一类土对湿度状态的变化就特别敏感。当粘土矿物中蒙脱石的质量分数达到 5% 时, 即对土的膨胀性与强度产生影响^[7]。因此, 应用 X 射线衍射半定量方法对各土样粘土矿物进行测试, 其结果见表 3。

由表 3 可以看出, 各土样粘土矿物以伊-蒙混层矿物为主, 且含量很高, 都在 50% 以上。从矿物成分来看, 按照文献[5]的膨胀土工程地质分类表, 路基填土的膨胀性等级均为强膨胀土, 这对于填土路基极为不利。

表 3 矿物成分分析

| Tab. 3 Mineral Composition Analysis | | | | | | | w _B /% |
|-------------------------------------|------|-----|-----|------|------|-----|-------------------|
| 土样编号 | 石英 | 高岭石 | 伊利石 | 正长石 | 伊-蒙石 | 钠长石 | |
| 1 1 ② | 19.4 | 1.2 | 2.4 | 24.9 | 50.4 | 1.7 | |
| 1 1 ③ | 18.7 | 2.4 | 2.6 | 24.0 | 48.5 | 3.8 | |
| 1 1 ⑤ | 17.8 | 2.3 | 5.7 | 22.8 | 46.2 | 5.2 | |
| 2 2 ① | 18.3 | 1.3 | 1.4 | 23.5 | 47.6 | 7.9 | |
| 2 2 ② | 18.1 | 1.7 | 2.6 | 23.0 | 47.0 | 7.6 | |
| 2 2 ③ | 18.5 | 1.2 | 3.7 | 23.7 | 48.0 | 4.9 | |
| 2 2 ④ | 19.1 | 0.8 | 2.9 | 24.5 | 49.7 | 3.0 | |
| 2 3 ② | 19.8 | 1.0 | 3.6 | 24.2 | 49.0 | 3.4 | |
| 2 3 ③ | 19.4 | 1.9 | 0.4 | 25.0 | 50.6 | 2.7 | |
| 2 3 ④ | 18.9 | 2.1 | 2.3 | 24.2 | 49.1 | 3.4 | |
| 2 3 ⑤ | 18.6 | 2.0 | 4.4 | 23.8 | 48.2 | 3.0 | |

2.5 填土自由膨胀率试验

膨胀土产生膨胀的基本缘由在于土粒与水的相互作用, 其在一定条件下表现为体积增大。自由膨胀率为松散的烘干土粒在水和空气中分别自由堆积的体积之差与在空气中自由堆积的体积之比^[10], 用来判定无结构力的松散土粒在水中的膨胀特性。目前, 国内外仍然应用其作为膨胀土的初步定性判别指标。依据文献[4], 用原取土场风干土样做自由膨胀率试验, 结果见表 4。

由表 4 可见, 各土样的自由膨胀率为 12%~39%, 小于规范规定膨胀土自由膨胀率的最小值 40%, 对土样 2 2 ③、2 2 ④等可以判定为弱膨胀土。但中国大量膨胀土研究成果和工程实际资料表明, 即使土自由膨胀率在 30%, 也常常有路基产生变形

病害^[8],故不能单由此来判定此填土的膨胀性。

表 4 自由膨胀率及胀缩总率

Tab. 4 Free Expansive and Swell Shrink Total Ratio

| 土样编号 | 自由膨胀率 / % | 胀缩总率 / % |
|-------|-----------|----------|
| 1-1 ② | 20.0 | 3.15 |
| 1-1 ③ | 26.0 | 4.22 |
| 1-1 ④ | 26.0 | 2.10 |
| 1-1 ⑤ | 20.0 | |
| 2-2 ① | 12.5 | 0.69 |
| 2-2 ② | 26.0 | 2.69 |
| 2-2 ③ | 39.5 | 12.46 |
| 2-2 ④ | 34.5 | 2.11 |
| 2-3 ② | 25.5 | 4.12 |
| 2-3 ③ | 31.5 | 3.12 |
| 2-3 ④ | 16.0 | 1.95 |
| 2-3 ⑤ | 34.0 | 2.67 |

2.6 填土的胀缩总率

胀缩总率能反映膨胀土的粘土矿物成分和结构特征,在一定条件下,它是膨胀土比较稳定的属性指标,同时也是公路工程中有实用价值的重要指标。胀缩总率为

$$ep_s = ep_{50} + c_s (w - w_s)$$

式中: ep_s 为胀缩总率(%); ep_{50} 为 50 kPa 下土的膨胀率(%); c_s 为收缩系数; w 为天然含水率(%); w_s 为可能产生的含水量下限值。

表 4 中原状土胀缩总率,除了 2-2 ① 之外,其他土样的值都大于 2 %,说明 3 个取土场的土样胀缩性都比较强,其中以土样 2-2 ③ 为最大,达 12.46 %,这显然不能满足文献[5] 胀缩总率小于 0.7 % 的要求。同时这些土样在 50 kPa 条件下的膨胀率很小,说明这些土的收缩性较大。

2.7 填土的击实及承载比试验

路基填筑土的膨胀性也可利用浸水承载比膨胀率来进行判别和分类^[9]。通过击实试验可指导施工时含水量的控制,承载比试验可进一步考察压实填土路基膨胀性及承载力。

2.7.1 击实试验

依据文献[4],使用 JDS 2 型数控电动击实仪,采用重型法对土样进行击实,获得 3 个取土场原状土样各自的最优含水率和最大干密度,结果如表 5。

2.7.2 承载比试验

为了模拟试料在使用过程处于最不利状态,贯入试验前将试样浸水饱和 4 d 作为设计状态,且为

了模拟地基的上覆压力,试样表面加了荷载块。浸泡后,测其膨胀量,泡水结束后进行贯入试验。试验操作按照文献[4] 执行,试验结果见表 5。

表 5 击实及承载比试验

Tab. 5 Results of the Compaction and Bearing Ration Test of Filled Soil

| 土样编号 | 最优含水率 / % | 最大干密度 / (g · cm ⁻³) | 膨胀率 / % (g · cm ⁻³) | 干密度 / (g · cm ⁻³) | 吸水量 / g |
|------|-----------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---------|
| 1-1 | 18.3 | 1.87 | 1.919 | 1.869 | 71 |
| 2-2 | 16.7 | 1.85 | 3.411 | 1.860 | 178 |
| 2-3 | 21.7 | 1.75 | 1.053 | 1.779 | 21 |

| 土样编号 | l= 2.5 mm | | l= 5 mm | |
|------|-----------|---------|----------|---------|
| | 压力 / kPa | 承载比 / % | 压力 / kPa | 承载比 / % |
| 1-1 | 413 | 5.9 | 503 | 4.8 |
| 2-2 | 268 | 3.8 | 379 | 3.6 |
| 2-3 | 554 | 7.9 | 823 | 7.8 |

由表 5 可见,各取土场的最优含水率各不相同。由各土样浸水膨胀率可看出,各压实土都有一定的膨胀性,压实土样 2-2 的膨胀率达到 3.4 %,压实填土的承载比都低于文献[5] 对一级公路路基填土强度不小于 8 % 的要求,说明如不加处理直接压实不能满足一级公路对路基强度的要求。

3 填土膨胀性评价

上述试验所得的各指标数据,都各自从不同角度反映了填土的一些膨胀性质,但决定膨胀土特殊工程性质的因素是多方面的,单纯用一二个指标来进行判别将产生一定的误判。结合具体工程考虑多种指标进行综合判别和分类,更利于工程建设。

首先,用塑性图来进行判定。塑性图不仅能充分反映直接影响胀缩性能的物质组成部分,而且还能在一定程度上反映控制形成胀缩性能的浓差渗透吸附结合水的发育程度,物理概念明确,在实践上简单易行,所以运用广泛^[4,8]。当土的塑性指标在塑性图上满足 $w_L > 40 %$ 而且位于 A 线($I_P = 0.63(w_L - 20)$) 以上时,便可将其判为膨胀土,其判别结果见图 2。

由图 2 可见,除编号为 1-1 ② 和 2-3 ④ 的土样处临界状态外,其他都在膨胀土的范围之内,液限都小于 60 %,属于弱膨胀土的范畴。

众所周知,膨胀土是粘粒含量高,矿物成分多

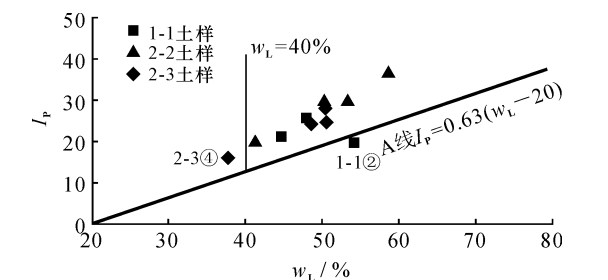


图 2 塑性图

Fig. 2 Plasticity Chart

以蒙脱石及伊利石等粘土矿物为主的高分散的粘土。从这一概念出发, 根据矿物成分、粒度组成和其他物性指标按表 6 进行再次判定。由于粘粒质量分数为 27%~35%, 液限为 37%~54%, 塑性指数为 30~34, 整体胀缩总率为 0.69~3.4, 伊-蒙混层矿物质量分数为 50%, 自由膨胀率整体较低, 个别可达到中膨胀土, 但总体上属弱膨胀土。承载比试验中压实土膨胀量达到 3.4%, 说明路基直接压实后会有较大地胀缩变形。

表 6 按土的粒度组成和物性指标分类

Tab. 6 Particle and Physical Index Classification of Swelling Soil

| 膨胀土 等级 | w(粘粒) I/% | w(粉粒) I/% | 液限 I/% | 塑性 指数 | 比表面积 I/(m ² ·g ⁻¹) |
|-----------|--------------|--------------|-----------|----------|--|
| 强 | > 50 | > 40 | > 48 | > 25 | > 300 |
| 中 | 35~50 | 40~50 | 40~48 | 18~25 | 150~300 |
| 弱 | < 35 | < 50 | < 40 | < 18 | < 150 |

综上所述, 通过膨胀土分类塑性图综合考虑决定土膨胀性的多项物理力学性质指标, 可判定该路基填土为弱膨胀土, 压实后有一定膨胀性, 不宜直接做路基填土。

由于自由膨胀率指标没有包含膨胀土的结构, 也不存在附加荷载与侧限等条件, 本身存在多种缺陷和不确定因素^[10], 据统计, 以自由膨胀率 40% 为判别界限, 有 11% 的膨胀土误判为非膨胀土^[8]。如单方面考虑自由膨胀率, 此次试验结果就会得出大多为非膨胀土的错误结论。这更加说明今后在应用自由膨胀率判定淤泥质软土膨胀性时要特别谨慎。从另一个侧面反映出如只按单一指标对膨胀性做出判定与分级, 难免会出现误判和漏判, 所以

对于像一级公路这样的大工程, 必须综合考察各项指标, 进行全面分析, 才能使出现事故的风险降到最低, 从而有效地节约投资, 保证设计、施工的进程。

4 结语

(1) 路基填土为高液、塑限的淤泥质软土, 具有弱膨胀性, 在含水量变化差异性影响下的胀缩变形将可能导致路基开裂。在设计与施工的过程中应该考虑此类土的膨胀性, 不宜直接做路基填土。

(2) 自由膨胀率不能准确地反映淤泥质软土的膨胀性, 容易造成误判, 故应用这一指标判断此类土膨胀性时要特别谨慎。

(3) 3 个取土场填土的最佳含水率各不相同, 分别为 18.3%、16.7% 和 21.7%, 所以不同土场不要混填。由于填土天然含水率较高, 可在土场挖深沟排水, 同时采取在土场翻晒的办法, 降低土的含水率。

参考文献:

[1] 张爱军, 哈岸英, 骆亚生. 压实膨胀土的膨胀变形规律与计算模式[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(7): 1236 1241.

[2] Robert W D. Swell Shrink Behavior of Compacted Clay [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 121(4): 386 387.

[3] 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.

[4] JTJ 051 93, 公路土工试验规程[S].

[5] JTJ 013 95, 公路路基设计规范[S].

[6] 方小磊, 黄小军, 许明军. 膨胀土的初步判别指标[J]. 公路工程与运输, 2004(12): 94 97.

[7] 方磊, 唐蓓华, 许明军, 等. 高速公路路基填土膨胀性判别和分类[J]. 公路交通科技, 2005, 22(4): 31 34.

[8] 李生林, 秦素娟, 薄遵昭, 等. 中国膨胀土工程地质研究[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992.

[9] 余湘韵, 王媛. 掺石灰处理膨胀土路基填土的试验研究[J]. 公路, 2000(1): 13 16.

[10] 张倩. 谈谈自由膨胀率试验的局限性[J]. 交通标准化, 2004, 4(4): 24 26.

[11] 毛新虎. 公路膨胀土路堑边坡防护方案探讨[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(4): 49 53.