

文章编号: 1000-7598-(2004)09-1418-05

高速公路膨胀土路堤处治后期土体性状试验验证

胡明鉴, 刘观仕, 孔令伟, 陈善雄

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 为了解膨胀土路基改性填筑后的土体性状, 加深对膨胀土改性处治的认识, 对某高速公路膨胀土路基改性处治 1 年多以后的土体性状进行了后期试验验证。结果表明: 膨胀土路基后期含水量和干密度均有不同程度的变化, 变化规律与处治方式、钻孔位置和取样深度密切相关。膨胀土直接用于路基填筑, 后期干密度有所降低, 将对路基长期稳定性造成不利的影 响; 石灰改性后填筑后期干密度的增加, 有利于路基的长期稳定; 煤粉灰改性在一定程度上改善了膨胀土性能, 但处治效果不如石灰, 隐患尚未彻底消除。

关 键 词: 膨胀土路基; 改性; 性状; 后期验证

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Expansive soil character later test verification on freeway embankment treatment

HU Ming-jian, LIU Guan-shi, KONG Ling-wei, CHEN Shan-xiong

(Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: In the expansive soil area freeway embankment construction the expansive soil needs treatments if not take the displacement and refilling measures. This is especially necessary in the middle&strong expansive soils building foundations. In order to find out the status after the expansive soil embankment modified treatment and deepen the comprehension of the treatment effect ,we carried out the experiment about the expansive soil characteristic on freeway embankment construction one year later. Results show that the later moisture content and dry density changed in different degree which related to the treatment mode, boring position and sampling depth. Later dry density will reduction which will induce to safety incipient fault. If embankment fulling up with full expansive soil, the later dry density will increase and the long-term stability will be safeguard with lime modified expansive soil. Flyash improves the capability of the expansive soils in a certain extent, but the effect is not as good as the lime and the incipient fault haven't been eliminated thoroughly.

Key words: embankment of expansive soil; treatment; character; later verification

1 引 言

膨胀土是在自然地质过程中形成的一种多裂缝并具有显著胀缩特性的土体, 土中粘粒成分主要由强亲水性矿物(蒙脱石和伊利石)组成, 具有吸水膨胀、失水收缩和反复变形性。强烈的湿胀干缩性和土体中杂乱分布的裂缝, 对工程结构物具有严重的破坏作用。特别是对高等级公路路基工程和大型结构物所产生的变形破坏作用, 往往具有长期、潜

在的危险^[1]。《公路路基施工技术规范》JTJ033-95 第 9.13.5 条对膨胀土路基填筑有明确的规定: 强膨胀土稳定性差, 不应作为路基填料; 中等膨胀土宜经过加工、改良处理后, 可作为填料; 弱膨胀土应根据当地气候、水文情况及道路等级加以应用, 直接进行弱膨胀土路堤填筑时, 应及时对边坡及顶部进行防护^[2]。高速公路膨胀土问题已受到公路工程学科专家和工程技术人员的普通关注, 他们从不同角度、途径对膨胀土进行了物理、化学的改性试验研究, 并针对不同的工程实际问题, 采用各种方法

收稿日期: 2003-10-13

修改稿收到日期: 2004-01-15

基金项目: 国家重大基础研究前期研究专题项目(编号: 2003CCA02200) 和中国科学院武汉岩土力学研究所领域前沿基金项目(编号: Q110301)

作者简介: 胡明鉴, 男, 1974 年生, 工学硕士, 现从事岩土力学与岩土工程方面的工作。电话: 027-87197223

进行处理。常见的处理方法是在膨胀土中添加一定量的石灰、粉煤灰、水泥等进行土性改良，其中以添加石灰和粉煤灰最为常见，目前，已有大量针对膨胀土改性试验和施工技术的文章发表。钱玉林^[3]、余湘娟、王媛^[4]、陈善雄^[5, 6]、孔令伟^[7, 8]等对膨胀土掺石灰后改性效果进行了试验研究,并提出了经石灰改性后的膨胀土作为路基填料的施工和质量控制方法。姜明文^[9]、李华^[10]等进行了粉煤灰或石灰和粉煤灰联合处治的试验和施工应用研究，取得了膨胀土综合处治的经验和成果。部分研究成果已直接运用于实际工程中，指导工程建设。

在膨胀土路基填筑过程中，含水量和压实度一直是人们最为关心的问题。在长期施工中，虽然已逐渐具备丰富的施工经验，并形成较为完善的施工工艺和改性土填筑控制标准，但在机械压实后，经过一段时间，经历几个干湿循环、寒暑变迁、雨淋霜冻后，土体后期性状将会出现什么变化呢？含水量是增加还是减少？压实度会不会出现反弹？膨胀土路基内是否还存在水分再迁移？不同处治方法长期效果是否存在差异等？这些对膨胀土改性研究都具有重要的实际意义。遗憾的是对这些问题的研究很少开展，鲜见文章发表。针对这些问题，我们对某高速公路膨胀土路基改性试验段路基填筑完成 1 年多的改性处治效果进行了后期试验验证，对改性膨胀土路基填筑后期土体性状有了更深入的认识。

2 试验段概况

该试验段长为 240 m，路堤高为 5.0 m，分石灰

改良段、不改良包边段(包边采用非膨胀土或改性膨胀土)和粉煤灰改良段(受雨季的影响，粉煤灰含水量很大，难以将含水量降低到填筑范围，最后改为石灰土包边处治)三段(k101+230~k101+470)，每段长 80 m。具体分布如图 1。

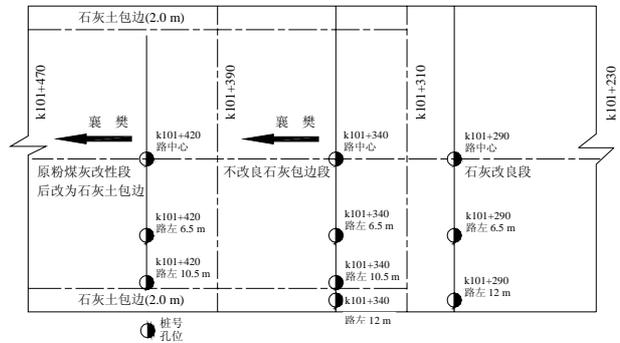


图 1 后期试验验证钻孔位置
Fig.1 Boring positions of the later test verification

试验场素土平均含水量为 25.4 %；液限为 60.8 %；塑性指数为 31.0；自由膨胀率为 71.3 %；结合膨胀土膨胀潜势等级，判定属中膨胀土胀缩等级标准。试验前后物性指标对比如表 1 所示。由此可见，经石灰和粉煤灰改性后，塑限增大；塑性指数、自由膨胀率减小；最佳含水量增大，最大干重度降低。随着石灰掺合比的增加，变化越显著。试验段石灰改性土实际填筑按质量掺合比为 6.0 %，压实含水量按 23.0 %控制，粉煤灰改性土按质量掺合比 50 %，压实含水量按 23.3 %控制。根据膨胀土路基施工技术规范的有关规定控制分层填筑的含水量和松铺厚度，检测记录各层含水量和压实度，作为后期试验验证的初始资料。

表 1 中膨胀土改性前后特性指标
Table 1 Characteristic indexes of medium expansive soil

土料和掺料	质量掺合比 /%	液限 /%	塑限 /%	塑性指数	自由膨胀率 /%	最佳含水量 /%	最大干密度 /g·cm ⁻³	50 kPa 压力下膨胀率 /%	收缩系数	胀缩总率 /%
膨胀土	0	60.8	29.8	31.0	71.3	15.8	1.64	-0.82	0.44	2.3
石灰	4.0	62.9	42.8	20.1	18	15.8	1.64	0.28	0.34	0.28
石灰	6.0	62.3	42.7	19.6	17	17.0	1.62	-0.47	0.26	-0.47
粉煤灰	40	54.4	27.5	26.9	38	16.0	1.42	0.24	0.14	0.24
粉煤灰	50	51.4	24.9	26.5	19	18.4	1.36	-0.94	-	-

3 钻探取样室内试验

科研试验段钻孔布置如图 1。根据该高速公路路基分层填筑部位和压实度差别，在深度为 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.4, 2.0, 2.5, 3.0 m 和 4.5 m 处钻探取样，因此，在路基压实度为 95 % 的区间内取样 3 个，在路基压实度为 93 % 的区间内取样 3 个，在压实度 90 % 的区间内取样 4 个。

受现场试验条件所限，且考虑到湿法钻取土样将直接影响后期含水量试验的结果，因此，选择对土样具有一定扰动性的干法钻探取样，进行密度试验时，应选择土样中心受扰动最小的部分进行试验。采用岩芯管 φ110，试样用完好的密封袋密封保存。室内测定含水量和密度，密度试验采用环刀法，环刀体积为 200 cm³。将试验所得的结果与填筑初期相同深度、相同处治方式下的初始值进行对比，以

分析膨胀土路基处治后期土体性状发生的变化。

4 试验结果对比分析

为叙述方便，将路基填筑时压实度和含水量称为此次对比试验的初期压实度和初期含水量，而将钻探取样所得的压实度和含水量称为后期压实度和含水量。将初期和后期含水量试验结果列于表 2。从中可看出，经过 1 年多时间，膨胀土路基填土，无论是石灰改性土填筑段、石灰土包边段还是原粉煤灰改性土填筑(后改为石灰土包边段)，后期含水量均比初期含水量有不同程度的增加，增幅受处治方式影响(如图 2 和图 3)。同一处治方式不同钻孔位置含水量增幅也不相同，主要表现为深度在 1.4~4.5 m 范围内，增幅很明显，后期含水量比初期含水量高出 2%~3%；在 0~1.1 m 范围内，后期含水量比初期含水量高出 1%~2%；在 1.1~1.4 m 范围内，后期含水量仅比初期含水量略高或相等，个别钻孔的在某一深度，甚至出现后期含水量比初期含水量稍小的情况。虽然后期含水量有所增加，但在当地自然气候条件下，通过自然平衡，仍处于某个稳定值范围，后期含水量一般稳定在 26%~29% 之间，比初期平均含水量高出约 2%~3%。

密度试验前后结果对比如表 3，干密度前后对比直观图如图 4 和图 5。通过试验前后结果对比，

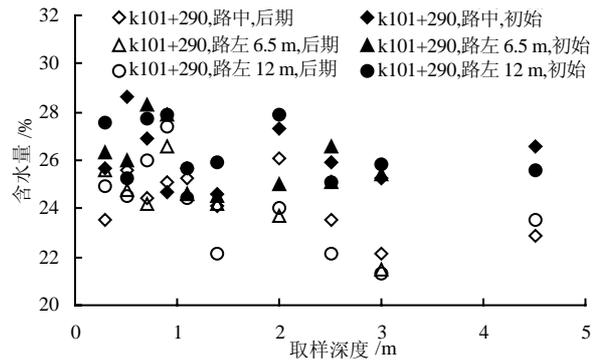


图 2 k101+290 石灰改性段前后含水量对比
Fig.2 Moisture content contrast of k101+290

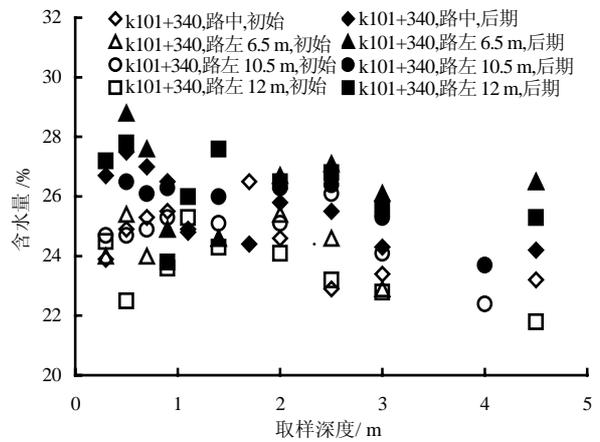


图 3 k101+340 石灰包边段前后含水量对比
Fig.3 Moisture content contrast of k101+340

表 2 试验路堤含水量前后对比分析(单位: %)
Table 2 Moisture content contrast of the test embankment (unit: %)

取样位置	时间	取样深度 /m									
		0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.4	2.0	2.5	3.0	4.5
k101+29 路中	初始	23.5	25.6	24.4	25.1	25.3	24.1	26.1	23.5	22.1	22.9
	后期	25.7	28.6	26.9	24.7	25.7	24.6	27.3	25.9	25.3	26.6
k101+29 路左 6.5 m	初始	25.6	24.8	24.2	26.6	24.6	24.2	23.7	25.1(2.7)	—	21.5
	后期	26.3	26.0	28.3	27.9	24.6	24.5	25.0	26.6(2.7)	—	25.4
k101+29 路左 12 m	初始	24.9	24.5	26.0	27.4	24.4	22.1	24.0	22.1	21.3	23.5
	后期	27.6	25.3	27.7	27.9	25.7	25.9	27.9	25.1	25.8	25.6
k101+340 路中	初始	23.9	24.9	25.3	25.5	24.9	26.5(1.7)	24.6	22.9	23.4	23.2
	后期	26.7	27.5	27.0	26.5	24.8	24.4(1.7)	25.8	25.5	24.3	24.2
k101+340 路左 6.5 m	初始	24.0	25.4	24.0	24.9	—	24.6	25.4	24.6	22.9	26.5
	后期	—	28.8	27.6	24.9	—	24.6	26.7	27.1	26.1	26.5
k101+340 路左 10.5 m	初始	24.7	24.7	24.9	25.3	—	25.1	25.1	26.1	24.1	22.4(4.0)
	后期	—	26.5	26.1	26.3	—	26.0	26.3	26.4	25.3	23.7(4.0)
k101+340 路左 12 m	初始	24.5	22.5	—	23.6	25.3	24.3	24.1	23.2	22.8	21.8
	后期	27.2	27.8	—	23.8	26.0	27.6	26.5	26.8	25.6	25.3
k101+420 路中	初始	22.3	27.7	24.9	26.0	26.2	25.3	28.2	24.3	25.1(3.4)	27.5
	后期	27.7	25.8	26.0	27.8	27.2	25.3	26.9	25.5	27.0(3.4)	28.9
k101+420 路左 6.5 m	初始	22.4	24.7	24.8	25.9	25.6	24.5	22.8	22.8	25.5	—
	后期	—	—	27.8	28.0	27.1	27.0	25.8	26.3	27.5	—
k101+420 路左 10.5 m	初始	25.6	22.8	26.8	28.9	23.0	24.7	24.3	24.5	23.9	30.0
	后期	—	28.6	24.6	26.3	27.6	27.6	29.1	25.8	26.7	26.3

注: 括号内数字为实际取样深度(m)。

表 3 试验路堤干密度前后对比
Table 3 Dry density contrast of the test embankment

取样位置	参数	取 样 深 度 /m									
		0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.4	2.0	2.5	3.0	4.5
k101+290 路中	初期密度/g·cm ⁻³	1.560	1.540	1.520	1.570	1.581	1.591	1.540	1.531	1.553	1.440
	初期压实度/%	98.7	97.5	96.2	99.4	94.1	94.7	91.7	91.1	98.9	91.7
	后期密度/g·cm ⁻³	1.518	1.506	1.508	1.500	1.561	1.555	1.586	1.542	1.555	1.443
	后期压实度/%	96.1	95.3	95.5	94.9	92.9	92.6	94.4	91.8	99.0	91.9
k101+290 路左 6.5 m	初期密度/g·cm ⁻³	1.560	1.520	1.520	1.550	1.590	1.590	1.580	1.520 ^①	—	1.430
	初期压实度/%	98.7	96.2	96.2	92.3	94.6	94.6	94.0	90.5 ^①	—	91.1
	后期密度/g·cm ⁻³	1.561	1.509	1.507	1.553	1.577	1.591	1.584	1.523 ^①	—	1.442
	后期压实度/%	98.8	95.5	95.4	92.4	93.9	94.7	94.3	90.7 ^①	—	91.8
k101+290 路左 12 m	初期密度/g·cm ⁻³	1.540	1.530	1.570	1.550	1.590	1.620	1.580	1.540	1.450	1.510
	初期压实度/%	97.5	96.8	99.4	98.1	94.4	96.7	93.8	91.4	92.0	96.2
	后期密度/g·cm ⁻³	—	—	1.520	—	1.615	1.571	1.563	1.561	1.455	1.639
	后期压实度/%	—	—	96.2	—	96.1	93.5	93.0	92.9	92.7	97.6
k101+340 路中	初期密度/g·cm ⁻³	1.560	1.520	1.620	1.600	1.600	1.640 ^②	1.560	1.620	1.510	1.530
	初期压实度/%	98.7	96.4	96.4	95.2	95.2	97.6 ^②	92.9	96.4	96.2	97.5
	后期密度/g·cm ⁻³	1.502	1.501	1.604	1.583	1.576	1.578 ^②	1.572	1.588	1.486	1.496
	后期压实度/%	95.3	95.1	95.5	94.2	93.8	93.9 ^②	93.5	94.5	94.6	95.3
k101+340 路左 6.5 m	初期密度/g·cm ⁻³	1.560	1.560	1.610	1.620	—	1.540	1.630	1.560	1.610	1.530
	初期压实度/%	98.7	98.7	95.8	96.4	—	97.5	97.0	92.9	95.8	91.3
	后期密度/g·cm ⁻³	—	1.520	1.598	1.587	—	1.473	1.547	1.544	1.549	1.512
	后期压实度/%	—	96.2	95.1	94.5	—	93.2	92.1	91.9	92.2	90.0
k101+340 路左 10.5 m	初期密度/g·cm ⁻³	1.620	1.620	1.620	1.620	—	1.560	1.540	1.540	1.610	1.530
	初期压实度/%	96.4	96.4	96.4	96.4	—	98.7	97.5	97.5	95.8	97.5
	后期密度/g·cm ⁻³	—	—	1.601	1.598	—	1.512	1.527	1.527	1.617	1.531
	后期压实度/%	—	—	95.3	95.1	—	95.7	96.6	96.6	96.3	97.5
k101+340 路左 12 m	初期密度/g·cm ⁻³	1.550	1.528 ^③	—	1.539	1.659	1.665	1.647	1.635	1.650	1.640
	初期压实度/%	98.1	96.7 ^③	—	97.4	93.2	93.5	92.5	91.9	92.7	92.1
	后期密度/g·cm ⁻³	—	1.517 ^③	—	1.530	1.656	1.658	1.649	1.647	1.649	1.651
	后期压实度/%	—	96.0 ^③	—	96.8	93.0	93.1	92.6	92.5	92.6	92.8
k101+420 路中	初期密度/g·cm ⁻³	1.570	1.610	1.610	1.610	1.630	1.630	1.570	—	1.493	1.317
	初期压实度/%	99.4	95.8	95.8	95.8	97.0	97.0	93.5	—	94.5	92.7
	后期密度/g·cm ⁻³	—	1.592	1.590	1.572	1.576	1.568	1.563	—	1.471	1.298
	后期压实度/%	—	94.8	94.6	93.6	93.8	93.3	93.0	—	93.1	91.4
k101+420 路左 6.5 m	初期密度/g·cm ⁻³	1.550	1.610	1.610	1.630	1.630	1.620	1.550	1.550	1.510	—
	初期压实度/%	98.1	95.8	95.8	97.0	97.0	96.4	92.3	92.3	95.6	—
	后期密度/g·cm ⁻³	—	—	1.608	1.604	1.575	1.572	1.534	1.534	1.482	—
	后期压实度/%	—	—	95.7	95.5	93.8	93.6	91.3	91.3	93.8	—
k101+420 路左 10.5 m	初期密度/g·cm ⁻³	1.570	1.550	1.580	1.570	1.530	1.560	1.530	1.520	1.510	1.408
	初期压实度/%	99.4	98.1	100.0	99.4	96.8	98.7	91.1	90.5	95.6	92.6
	后期密度/g·cm ⁻³	—	—	1.555	1.502	1.473	1.474	1.513	1.552	1.517	1.412
	后期压实度/%	—	—	98.4	95.1	93.2	93.3	90.1	92.4	96.0	92.9

注：上标①，②，③的实际取样深度分别为 2.7，1.7，0.6 m。

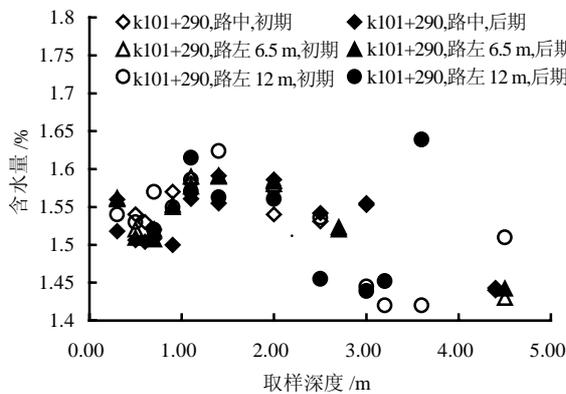


图 4 k101+290 石灰改性段前后干密度对比
Fig.4 Dry density contrast of k101+290

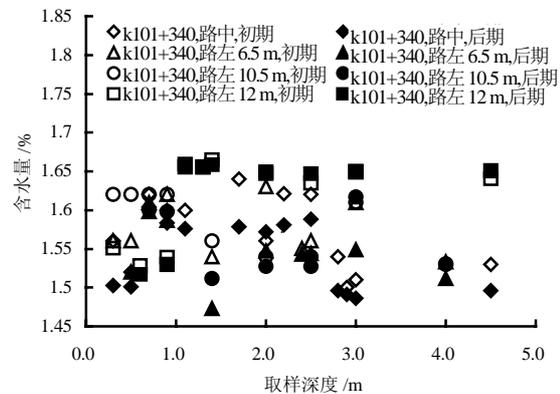


图 5 k101+340 石灰包边段前后干密度对比
Fig.5 Dry density contrast of k101+340

明显可以看出, 膨胀土路基处治方法不同, 土体干密度前后变化规律也不相同。主要表现为石灰改良段 k101+290 在深度 0~1.4 m 范围内, 后期干密度将比初期干密度降低; 在 2.0~4.5 m 深度范围内, 后期干密度比初期干密度有所增加。对于不改良石灰包边段, 离包边区域较远的 k101+340 路中心和 k101+340 路左 6.5 m 的钻孔, 后期干密度均比初期干密度小; 距离包边较近的 k101+340 路左 10.5 m 的钻孔, 后期干密度在 0~3.0 m 范围内减小, 在深度大于 3.0 m 后才出现缓慢、微小的增加; 处于石灰包边段的 k101+340 路左 12 m 的钻孔, 规律与石灰改性段(k101+290)一致, 表明素土填筑路基随着时间的推移, 填土干密度将逐渐减小, 压实度降低, 这对路基长期稳定具有很大的影响; 而石灰包边段填土干密度随着时间的推移不降反升, 有利于路基稳定。进而说明中膨胀土不宜直接用于路基填筑, 须做改性处理, 否则将会对路基稳定构成一定的安全隐患。

原煤粉灰改性段(后改成石灰包边段), k101+420 路中和 k101+420 路左 6.5 m 的钻孔, 后期干密度均比初期干密度小, 路边孔(k101+420 路左 10.5 m)在深度 0~2.0 m 内, 后期干密度比初期干密度小, 在 2.0~4.5 m 深度内, 后期干密度仅比初期干密度有少许增加。说明掺煤粉灰在一定程度上改善了膨胀土性能, 提高了路基综合承载能力, 但随着时间的推移, 干密度会降低, 长期稳定性难以保证, 安全隐患尚未彻底消除。也说明煤粉灰改性土虽然对施工、路基综合承载能力和稳定性等产生了一定的积极作用, 但效果不如石灰改性处治明显。

5 结 论

膨胀土路基填筑完成经历一定时间后, 后期含水量将增加, 增幅与处治方式、钻孔位置和取样深度有关。后期含水量一般稳定在 26%~29% 之间, 比初期平均含水量高出 2%~3%。

后期干密度变化受处治方式、钻孔位置和取样深度的影响。在深度 0~1.4 m 范围内, 石灰改良段后期干密度比初期干密度小; 在 2.0~4.5 m 深度范围内, 后期干密度比初期干密度增加。不改良石灰包边段只有在包边范围内的钻孔, 才会出现与石灰改性段相同的规律, 其它钻孔后期干密度均比初期干密度小。说明若直接用中膨胀土填筑路基, 长期

稳定性难以保证, 须进行改性处理, 否则将会对路基稳定构成一定的安全隐患。

试验结果还说明在膨胀土中掺煤粉灰后在一定程度上改善了膨胀土性能, 提高了路基综合承载能力, 但后期干密度仍会随时间而降低, 安全隐患尚未彻底消除, 难以保证路基长期稳定性, 其处治效果不如石灰改性处治明显。

膨胀土路基填筑完成以后, 仍需作好路面和路基边坡的防水防渗工作, 以保障路基的长期稳定性。

参 考 文 献

- [1] 孙惠兰, 徐培华. 高等级公路膨胀土地段路基施工技术[J]. 筑路机械与施工机械化, 1999, 16(4): 35—39.
- [2] JTJ033-95, 公路路基施工技术规范[S].
JTJ033-95, Highway embankment construction technical regulation[S].
- [3] 钱玉林, 卜龙章, 胡顺洋等. 石灰稳定膨胀土的效用及其施工质量控制[J]. 岩土力学, 2002, 23(3): 325—328.
QIAN Yu-lin, BO Long-zhang, HU Shun-yang, YIN Zong-Ze. Effectiveness of stabilized expansive lime soil and construction quality control[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(3): 325—328.
- [4] 余湘娟, 王媛. 掺石灰处理膨胀土路基填料的试验研究[J]. 公路, 2000, (1): 13—16.
- [5] 陈善雄, 孔令伟, 郭爱国等. 膨胀土工程特性及其改性试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(增): 9—12.
CHEN Shan-xiong, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo. Experimental research on engineering properties of expansive soil and lime stabilized soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(Supp.): 9—12.
- [6] 陈善雄, 孔令伟, 郭爱国等. 湖北省襄荆高速公路膨胀土路段膨胀土特性和工程处理与防护研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2002.
- [7] 孔令伟, 郭爱国, 胡明鉴等. 湖北省襄十高速公路膨胀土路基治理方案、施工工艺和监控技术研究报告[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2002.
- [8] 孔令伟, 胡明鉴, 郭爱国等. 湖北省襄十高速公路膨胀土路堤处置效果试验验证与理论评估研究报告[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2002.
- [9] 姜明文, 吴静, 文纪宏. 粉煤灰在长余高速公路路基工程中的应用[J]. 辽宁交通科技, 2002, 25(4): 21—22.
- [10] 李华. “二灰土”处治膨胀土路基的施工实践[J]. 河南交通科技, 1997, (4): 43—45.