

膨胀土路基含水量在不同气候条件下的变化规律模型试验研究

杨果林¹, 刘义虎²

(1. 中南大学 土木建筑学院, 湖南 长沙 410075; 2. 湖南省交通规划勘察设计院, 湖南 长沙 410011)

摘要: 针对广西南友公路宁明地段中等膨胀土和湖南常张公路慈利地段弱膨胀土, 通过六组膨胀土路基室内模型试验, 在不同排水边界和不同压实条件下, 分别模拟路基在积水、阴天、日照、降雨时, 膨胀土路基中含水量的变化规律、水的入渗和蒸发速度等, 这对膨胀土路基的设计和施工具有重要的理论和工程实际意义。

关键词: 土力学; 膨胀土路基; 含水量; 气候条件影响; 模型试验

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)24-4524-10

EXPERIMENTAL STUDY ON MOISTURE CONTENT IN EXPANSIVE SOIL ROADBED UNDER DIFFERENT WEATHER CONDITIONS

YANG Guo-lin¹, LIU Yi-hu²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410075, China;
2. Hunan Provincial Communications Planning, Surveying and Design Institute, Changsha 410011, China)

Abstract: With six tests of expansive soils for the roadbeds, which come from Ningming section of Nanning—Youyiguan Highway in Guangxi Autonomous Region, and Cili section of Changde—Zhangjiajie Highway in Hunan Province, respectively, are analyzed under different weather conditions such as dewatering, overcast, sunshine and precipitation. The different dewatering boundaries, the densities of roadbed, the accumulated water contents are considered for the roadbed. The moisture contents variation, water permeation and evaporation in the expansive soils roadbed are also researched. The achieved results can provide some useful references for the design and construction of expansive soils roadbed.

Key words: soil mechanics; expansive soil roadbed; moisture content; weather influence; modeling test

1 引言

膨胀土是在自然地质过程中形成的一种多裂隙并具有显著胀缩性的地质体, 粘粒成分主要由亲水性矿物蒙脱石与伊利石组成。膨胀土吸水膨胀、失水收缩并反复变形的性质, 以及土体中随机分布的裂隙, 对公路路基、路堑边坡等都有潜在破坏作用。为此, 国内外许多学者提出很多处治方法, 但同时

也耗费了巨大的工程费用。

膨胀土问题是全球性的技术难题, 虽然经过半个多世纪的研究, 但至今在各国的工程建设中膨胀土引起的工程问题仍频繁发生并造成巨大的经济损失。膨胀土路基受水的影响显著, 研究结果^[1-3]表明, 只要膨胀土土体内部含水量发生 1% 的变化, 将会引起膨胀土工程性质的显著变化, 进而发生路基失稳等工程事故。为此, 研究不同气候条件下膨胀土路基中含水量的变化, 进而研究膨胀土路基受气候

收稿日期: 2004-07-26; **修回日期:** 2004-10-30

基金项目: 西部交通建设科技项目(200231800015); 湖南省自然科学基金资助项目(04JJ3085)

作者简介: 杨果林(1963-), 男, 博士, 2001 年于中南大学道路与铁道工程专业获博士学位, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩土工程、道路与铁道工程和结构工程等方面的教学与研究工作。E-mail: guoling@mail.csu.edu.cn.

影响的深度、含水量随深度变化规律、膨胀土路基表层土体水分蒸发与入渗基本规律,并提出避免水损害路基的有效防治措施等^[4-6],这将对公路、铁道、房建等具有重要的意义。

2 膨胀土路基模型试验简介

模型箱尺寸为 3 m×3 m×1 m (长×高×宽)。如图 1 所示,模型箱有两个侧面和一个底面为混凝土墙面组成,并含有一个 3 m×3 m (长×高)的有机玻璃观测面;同时还有两个临空面,即一个顶面和一个 3 m×1 m (高×宽)为路堤边坡面。有机玻璃观测面下部为 0.6 m×3.0 m×1.0 cm (高×宽×厚)的竹胶板,上部为 2.4 m×3.0 m×1.0 cm (高×宽×厚)有机玻璃。竖向每隔 30 cm,横向每隔 50 cm,用钢管作支挡,以防止有机玻璃面发生侧向变形。

分别用广西南友公路宁明地段中等膨胀土、湖南常张公路慈利地段弱膨胀土作为模拟试验的路基填料。膨胀土路堤在不同压实度和不同排水(路基底用 10 cm 的砂垫层,再铺一层土工布,模拟排水边界条件;路基底用 10 cm 的砂垫层,再铺一层两布一膜土工膜,模拟不排水边界条件)边界条件下,路堤边坡坡度分别为 1:0.75, 1:1.00, 1:1.50 情形时,模拟路基分别在堤顶积水(保持堤顶时刻有水)、阴天(即不降雨、也无日照)、日照(用强光照模拟,保持堤顶、坡面温度为 40℃左右)、降雨(用淋喷头洒水,每天约 0.5 h,降雨量为 0.5 m³/(0.5 h)) 4 种不同气候条件下,每种(气候)条件历时 7 d 左右,研究路基中水的入渗、蒸发及土中含水量的变化规律等。

试验用仪器设备为江苏南通中天精密仪器有限公司的 MG-2 型高精度测墒仪一套和 MS-2 型 FDR 土壤水分探测器,测量精度为 0.1%。试验参照相关规范、规程进行^[7-10]。

各组试验简况如表 1 所示,各组元器件布置如图 2~4 所示。

3 膨胀土路基模型试验

3.1 第一组模型试验

3.1.1 第一组模型试验结果与分析

试验结果整理如图 5,表 2 所示。

由表 2 可知,最底层的 25#探头,距路堤顶面的距离为 2 m,从 2003 年 10 月 6 日开始的含水量 6.3%到积水后 6 d,即历时 144 h 后,含水量增大到 43.7%,入渗速度为 13.9 mm/h。随后,含水量略有上升,到 10 月 18 日开始日照前的含水量为 45.5%,增大了 1.8%;日照后含水量缓慢降低,到 10 月 25 日开始降雨前,即日照 6 d 后含水量降低到 43.3%,含水量降低总量为 2.2%。

距路堤顶面 1.5 m 的中间层 40#探头,从 10 月 6 日开始积水前的含水量 6.7%到积水 4.5 d,即历时 120 h 后,含水量增大到 42.9%,水的入渗速度为 13.9 mm/h。此后的积水阶段,此探头处含水量略有上升,到 10 月 18 日开始日照前的含水量 43.3%,上升了 0.4%,即基本保持稳定。日照后,含水量缓慢降低,到 10 月 25 日开始降雨前含水量降低到 42.2%,即日照 6 d 后。日照阶段,含水量降低总量为 1.1%。此后为模拟降雨阶段,模拟降雨时间为 6 d,含水量由降水前的 42.2%增大到 42.9%,增大了 0.7%。

最顶层的 30#探头,距路堤顶面 1.0 m,从 10 月 6 日开始的含水量 8.4%到积水 3 d 后,即历时 72 h 后的含水量为 45.5%,入渗速度为 13.9 mm/h,此后的积水阶段,含水量基本保持稳定,到 10 月 18 日开始日照前的含水量为 45.9%,仅增加了 0.4%;日照后含水量缓慢降低,到 10 月 25 日开始降雨前,含水量降低到 44.8%,即日照 6 d 后,含水量降低总

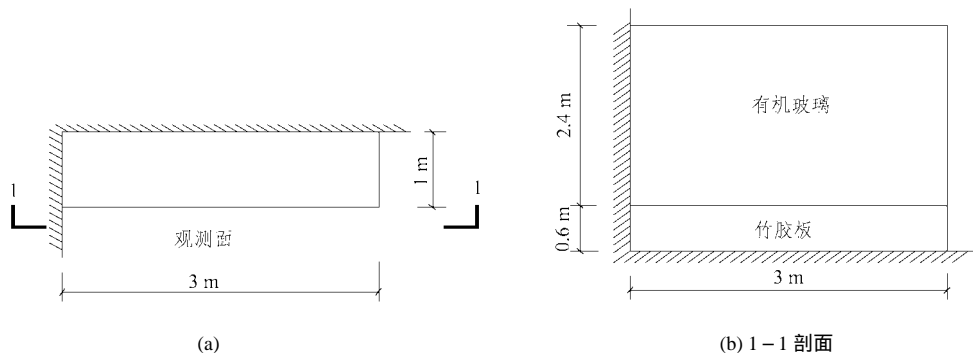


图 1 模型箱示意图

Fig.1 Schematic diagrams of model trunk

表 1 各组模型试验简况

Table 1 Introduction of every model test

模型试验组号	路堤填料来源	膨胀土性质	密实度/%	路堤坡度	排水边界条件	模拟试验阶段	备注
第一组	南友公路	中等膨胀土	60~70	1	0.75	不排水	9月13日~9月29日, 为模拟路堤修筑期
							10月6日~10月17日, 坡顶积水 12 d
							10月18日~10月24日, 日照 6 d
							10月25日~10月31日, 降雨 6 d
第二组	常张公路	弱膨胀土	90	1	0.75	排水	12月8日~12月16日, 坡顶积水 9 d
							12月17日~12月23日, 阴天 7 d
							12月24日~12月30日, 日照 7 d
第三组	常张公路	弱膨胀土	90	1	1.00	排水	1月30日~2月5日, 坡顶积水 7 d
							2月6日~2月12日, 阴天 7 d
							2月13日~2月19日, 日照 7 d
第四组	南友公路	中等膨胀土	90	1	0.75	不排水	4月5日~4月22日, 坡顶积水 18 d
							4月23日~4月27日, 阴天 5 d
第五组	南友公路	中等膨胀土	90	1	1.00	不排水	4月28日~5月26日, 坡顶积水 29 d
							5月27日~5月30日, 阴天 4 d
第六组	南友公路	中等膨胀土	90	1	1.50	不排水	5月31日~6月6日, 阴天 7 d
							6月7日~6月16日, 日照 10 d
						6月17日~6月23日, 降雨 7 d	

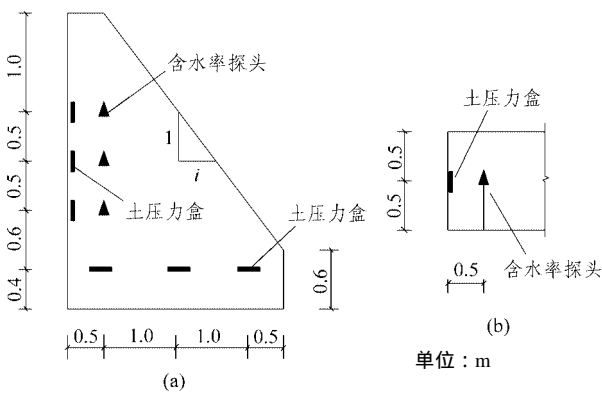


图 2 第一组试验元器件布置图

Fig.2 Device distribution of the first test

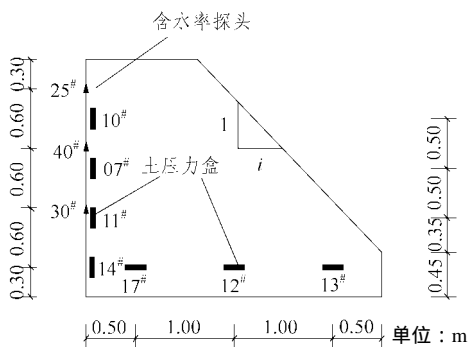


图 3 第二和第三组试验元器件的布置图

Fig.3 Device distribution of the second and third tests

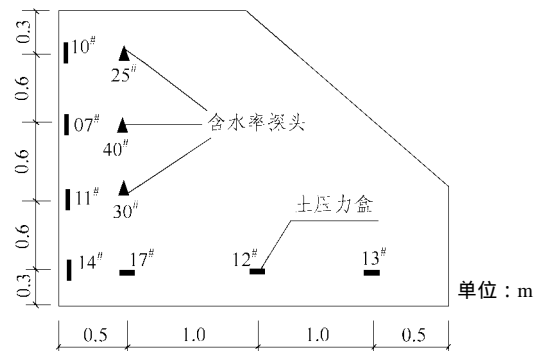


图 4 第四、五和第六组模型试验元器件的布置图

Fig.4 Device distribution of the fourth, fifth and sixth tests

量为 1.1%。

由图 5 可知, 从起始含水量为 6% 左右, 到积水后 7 d 则变为 45%~46%, 随后含水量基本保持稳定; 日照后含水量缓慢降低; 降雨后含水量又缓慢上升。

3.1.2 第一组模型试验结论

(1) 水在膨胀土路堤中的入渗、蒸发与路堤密实、排水边界条件关系密切。

(2) 相比较而言, 膨胀土中水分的蒸发速度慢于入渗速度。

(3) 密实度为 60%~70%, 模拟排水边界条件

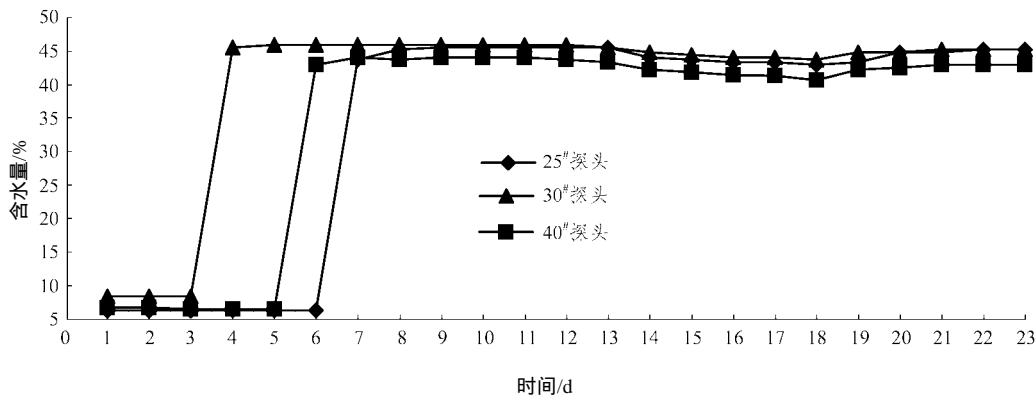


图 5 第一组室内模拟试验含水量随时间的变化曲线

Fig.5 Relationship curves between moisture contents variation and time in the first test

表 2 第一组模拟试验结果

Table 2 Testing results of simulated test for the first test

日期/年月日	含水量/%			试验条件
	30#探头	40#探头	25#探头	
20031006	8.4	6.7	6.3	积水第 1 d
20031007	8.4	6.7	6.3	积水第 2 d
20031008	8.4	6.5	6.3	积水第 3 d
20031009	45.5	6.5	6.3	积水第 4 d
20031010	45.9	6.5	6.3	积水第 5 d
20031011	45.9	42.9	6.3	积水第 6 d
20031012	45.9	44.0	43.7	积水第 7 d
20031013	45.9	43.7	45.2	积水第 8 d
20031014	45.9	44.0	45.5	积水第 9 d
20031015	45.9	44.0	45.5	积水第 10 d
20031016	45.9	44.4	45.5	积水第 11 d
20031017	45.9	43.7	45.5	积水第 12 d
20031018	45.5	43.3	45.5	日照第 1 d
20031020	44.8	42.2	44.0	日照第 2 d
20031021	44.4	41.8	43.7	日照第 3 d
20031022	44.0	41.4	43.3	日照第 4 d
20031023	44.0	41.3	43.3	日照第 5 d
20031024	43.7	40.6	43.7	日照第 6 d
20031025	44.8	42.2	43.3	降雨第 1 d
20031026	44.8	42.5	44.8	降雨第 2 d
20031027	45.2	42.9	44.8	降雨第 3 d
20031028	45.2	42.9	45.2	降雨第 4 d
20031029	45.2	42.9	45.2	降雨第 5 d
20031030	45.2	42.9	45.2	降雨第 6 d

注：表中所测数据为当天开始试验前的测试数据。

下，在以南友公路宁明地段膨胀土为填料的路基中，水的入渗速度为 13.9 mm/h。

(4) 起始含水量为 6% 左右的干膨胀土，积水 1 周后含水量达 45% ~ 46%，随后含水量基本保持稳定；日照后含水量缓慢降低；降雨后含水量又缓慢

上升。

3.2 第二组模型试验

3.2.1 第二组模型试验结果

第二组模型试验含水量观测数据如图 6 和表 3，4 所示。

含水量随时间的变化规律如图 6，表 3 所示。

从图 6 可见：起始含水量为 10% ~ 13%，到积水 3 ~ 5 d 后变为 30% 左右，随后含水量基本保持稳定；日照后含水量缓慢降低；降雨后含水量又缓慢上升。

从表 3 可见：最顶层的 25# 探头，距路堤顶面 0.3 m，从 2003 年 12 月 8 日开始的含水量 10.1% 到积水 36 h 的 32.6%，入渗速度为 8.33 mm/h。此后的积水阶段，含水量基本保持稳定，到 12 月 17 日开始模拟阴天气气候条件前的含水量 31.5%，降低了 1.1%。此后，含水量缓慢降低，阴天气气候 7 d 后，即开始日照前的 12 月 24 日含水量降到 27.9%，此阶段含水量降低了 3.6%。随后，模拟日照 7 d，含水量由 27.9% 降到 26.7%，含水量降低了 1.2%。第四阶段为模拟降雨阶段，含水量上升，由模拟降雨前的 26.7% 增加到降雨 7 d 后的 31.0%，含水量增加了 4.3%。

中间层的 40# 探头，距路堤顶面 0.9 m，从 12 月 8 日开始的含水量 10.5% 到积水 84 h 的 28.6%，入渗速度为 10.71 mm/h。此后的积水阶段，含水量基本保持稳定，到 12 月 17 日开始模拟阴天气气候条件前的含水量 29.8%，含水量增加了 1.2%；此后，含水量缓慢降低，阴天气气候 7 d 后，即开始日照前的 12 月 24 日含水量降到 26.2%，此阶段含水量降低了 3.6%。随后，模拟日照 7 d，含水量由 26.2% 降到日照的第 7 d，含水量降 25.5%，含水量降低了 0.7%。第四阶段为模拟降雨阶段，含水量上升，由

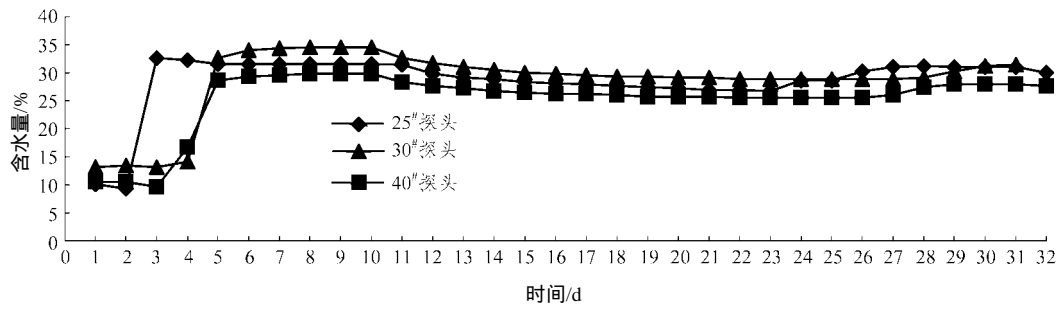


图 6 第二组室内模拟试验含水量随时间的总的变化曲线

Fig.6 Relationship curves between moisture contents variation and time in the second test

表 3 第二组模拟试验结果

Table 3 Testing results of simulated test for the second test

日期/年月日	含水量/%			试验条件
	25#探头	40#探头	30#探头	
20031208	10.1	10.5	13.1	积水第 1 d
20031209	9.3	10.5	13.4	积水第 2 d
20031210	32.6	9.6	13.1	积水第 3 d
20031211	32.2	16.7	14.1	积水第 4 d
20031212	31.5	28.6	32.6	积水第 5 d
20031213	31.5	29.3	34.0	积水第 6 d
20031214	31.5	29.5	34.3	积水第 7 d
20031215	31.5	29.8	34.5	积水第 8 d
20031216	31.5	29.8	34.5	积水第 9 d
20031217	31.5	29.8	34.5	阴天第 1 d
20031218	31.4	28.3	32.6	阴天第 2 d
20031219	29.8	27.6	31.7	阴天第 3 d
20031220	29.1	27.2	31.0	阴天第 4 d
20031221	28.8	26.7	30.5	阴天第 5 d
20031222	28.3	26.4	30.0	阴天第 6 d
20031223	28.1	26.2	29.8	阴天第 7 d
20031224	27.9	26.2	29.5	日照第 1 d
20031225	27.6	26.0	29.3	日照第 2 d
20031226	27.4	25.7	29.3	日照第 3 d
20031227	27.2	25.7	29.1	日照第 4 d
20031228	26.9	25.7	29.1	日照第 5 d
20031229	26.9	25.5	28.8	日照第 6 d
20031230	26.7	25.5	28.8	日照第 7 d
20040101	26.7	25.5	28.8	降雨第 1 d
20040102	28.6	25.5	28.8	降雨第 2 d
20040103	30.2	25.5	28.8	降雨第 3 d
20040104	31.0	26.0	28.8	降雨第 4 d
20040105	31.2	27.4	29.1	降雨第 5 d
20040106	31.0	27.9	30.2	降雨第 6 d
20040107	31.0	27.9	31.2	降雨第 7 d

注：表中所测数据为当天开始试验前的测试数据。

模拟降雨前的 25.5% 增加到降雨 8 d 后的 27.9%，含水量增加了 2.4%。

最底层的 30# 探头，距路堤顶面 1.5 m，从 12 月 8 日开始的含水量 13.1% 到积水 96 h 的 32.6%，入渗速度为 15.63 mm/h。此后的积水阶段，含水量基本保持稳定，到 12 月 17 日开始模拟阴天气候条件前的含水量 34.5%，含水量增加了 1.9%。此后，含水量缓慢降低，阴天气候 7 d 后，即开始日照前的 12 月 24 日含水量降到 29.5%，此阶段含水量降低了 5.0%。随后，模拟日照 7 d，含水量由 29.5% 降到 28.8%，含水量降低了 0.7%。第四阶段为模拟降雨阶段，含水量上升，由模拟降雨前的 28.8% 增加到降雨 7 d 后的 31.2%，含水量增加了 2.4%。

各位置的含水量在不同阶段的变化情况如表 4 所示。

3.2.2 第二组模型试验结论

本次试验 25#，40# 和 30# 探头的坐标 X，Y 值分别为 (0.0, 2.1)，(0.0, 1.5)，(0.0, 0.9)，单位均为 m。

(1) 不同的阶段，本文分为四个阶段，分别是第一阶段(模拟积水阶段 9 d 的前后含水量差)，第二阶段(模拟阴天阶段 7 d 的前后含水量差)，第三阶段(模拟日照阶段 7 d 的前后含水量差)，第四阶段(模拟降雨阶段 7 d 的前后含水量差)。其中第一阶段有 5 个物理量，分别是模拟积水开始时(w_{d0})，水入渗到探头位置(w_{d1})，前后含水量差(Δw_d)，历时(t)，入渗速度(v)；第二阶段有 3 个物理量，分别是模拟阴天开始时(w_{c0})，模拟阴天结束时(w_{c1})，前后含水量差(Δw_c)；第三阶段有 3 个物理量，分别是模拟日照开始时(w_{s0})，模拟日照结束时(w_{s1})，前后含水量差(Δw_s)；第四阶段有 3 个物理量，分别是模拟降雨开始时(w_{r0})，模拟降雨结束时(w_{r1})，前后含水量差(Δw_r)。含水量变化明显，历时 36 ~ 96 h 后，含水量从 10.1% ~ 13.1%，增大到 29.8% ~ 34.5%，增大 20% 左右。

表 4 第二组试验含水量测试结果对比分析

Table 4 Testing results comparative analysis of simulated test of the second set

探头 编号	第一阶段					第二阶段			第三阶段			第四阶段		
	$w_{d0}/\%$	$w_{d1}/\%$	$\Delta w_d/\%$	t/h	$v/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	$w_{c0}/\%$	$w_{c1}/\%$	$\Delta w_c/\%$	$w_{s0}/\%$	$w_{s1}/\%$	$\Delta w_s/\%$	$w_{r0}/\%$	$w_{r1}/\%$	$\Delta w_r/\%$
25 [#]	10.1	31.5	+21.4	36	8.33	31.5	27.9	- 3.6	27.9	26.7	- 1.2	26.7	31.0	+4.3
40 [#]	10.5	29.8	+19.3	84	10.71	29.8	26.2	- 3.6	26.2	25.5	- 0.7	25.5	27.9	+2.4
30 [#]	13.1	34.5	+21.4	96	15.63	34.5	29.5	- 5.0	29.5	28.8	- 0.7	28.8	31.2	+2.4

(2) 第一阶段后, 即积水期后, 膨胀土中的含水量较高, 尽管在第二阶段为阴天的气候条件, 但含水量降低较快, 降幅为 3.6% ~ 5.0%。

(3) 在第三阶段, 起始含水量接近最佳含水量, 尽管有 10 支 1000 W 的碘钨灯照射 7 d, 每天照射 6 h, 保持土表面温度为 40 左右, 但含水量降低的速率较第二阶段小, 降幅仅为 0.7% ~ 1.2%。

(4) 第四阶段, 为模拟降雨阶段, 每天降雨 0.5 h, 含水量增大了 2.4% ~ 4.3%。

(5) 相对而言, 路基中含水量越高, 受气候条件影响越明显, 水分越容易降低; 在最优含水量时水分降低较慢。

(6) 在排水边界条件下, 水的入渗速度随入土深度的增大而增大。

3.3 第三组模型试验

3.3.1 第三组模拟试验结果与分析

第三组模拟试验增加路堤削坡完成后到积水入渗阶段的含水量变化率, 其测试结果含有以下变量: 路堤削坡后探头位置(w_{x0}), 水入渗到探头位置(w_{x1}), 含水量差(Δw_d), 历时(t), 水的入渗速度(v), 而其余四个阶段及相应的变量和第二组试验基本相同。第三组模拟试验中, 第一阶段为模拟积水阶段 7 d 前后含水量差; 第二阶段为模拟阴天阶段 7 d, 前后含水量差; 第三阶段为模拟日照阶段 7 d, 前后含水量差; 第四阶段为模拟降雨阶段 7 d, 前后含水量差。

本次试验 25[#], 40[#], 30[#]探头的坐标 X, Y 值分别为(0.0, 2.1), (0.0, 1.5), (0.0, 0.9), 单位均为 m。

膨胀土室内模拟试验第三组含水量观测数据见图 7, 表 5。从图 7, 表 5 可知, 最顶层的 25[#]探头, 距路堤顶面 0.3 m, 从 2004 年 1 月 30 日开始的含水量 26.4% 到积水 1 d 后的 45.2%, 即 1 月 31 日, 历时 24 h, 入渗速度为 12.50 mm/h。此后的积水阶

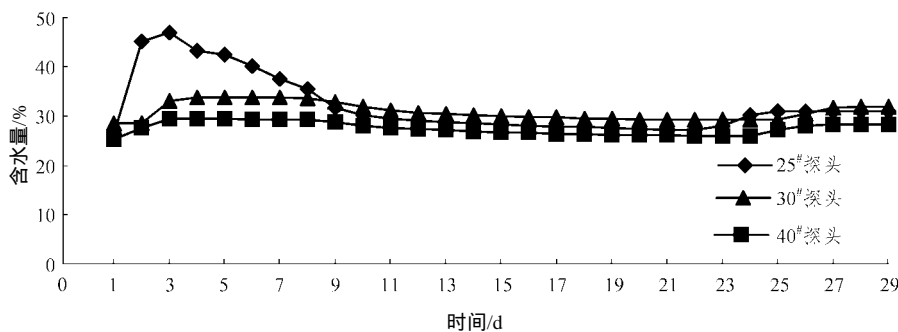


图 7 第三组模型试验含水量随时间变化曲线

Fig.7 Relationship curves between moisture contents variation and time in the third test

表 5 第三组模型试验含水量测试结果对比分析

Table 5 Testing results comparative analysis of simulated test of the third set

探头 编号	路堤削坡完成后到积水入渗阶段					第一阶段			第二阶段			第三阶段			第四阶段		
	$w_{x0}/\%$	$w_{d1}/\%$	$\Delta w_x/\%$	t/h	$v/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	$w_{d0}/\%$	$w_{d1}/\%$	$\Delta w_d/\%$	$w_{c0}/\%$	$w_{c1}/\%$	$\Delta w_c/\%$	$w_{s0}/\%$	$w_{s1}/\%$	$\Delta w_s/\%$	$w_{r0}/\%$	$w_{r1}/\%$	$\Delta w_r/\%$
25 [#]	26.4	45.2	+18.8	24	12.50	45.2	35.5	- 9.7	35.5	28.3	- 7.2	28.3	27.2	- 1.2	27.2	31.0	+3.8
40 [#]	25.3	29.5	+4.2	36	18.73	29.5	29.3	- 0.2	29.3	26.7	- 2.6	26.7	26.0	- 0.7	26.0	28.3	+2.3
30 [#]	28.6	33.1	+4.5	48	20.83	33.1	33.6	+0.5	33.6	30.0	- 3.6	30.0	29.3	- 0.7	29.3	31.9	+2.6

段,含水量稳定下降,到2月6日开始模拟无日照、无降雨的阴天气候条件前的含水量 35.5%,降低了 9.7%,这与 25#探头距坡顶距离较小,水份易蒸发有关;此后,第二阶段,含水量缓慢降低,阴天气候 7 d 后降到 28.3%,即开始日照前的 2月13日,含水量总共降低了 7.2%。随后,模拟日照 7 d 的第三阶段,含水量由 28.3%降到日照 7 d 后的 27.2%,含水量降低了 1.1%。第四阶段为模拟降雨阶段,含水量上升,由模拟降雨前的 27.2%增加到降雨 7 d 后的 31.0%,含水量增加了 3.8%。

中间层的 40#探头,距路堤顶面 0.9 m,从 2004 年 1月30日开始的 25.3%到积水 2 d 后的 29.5%,即 2月1日,历时 48 h,入渗速度为 18.75 mm/h,含水量变化幅度为 4.2%。此后的积水阶段,含水量基本保持稳定,到 2月6日开始模拟无日照、无降雨的阴天气候条件前的含水量 29.3%,含水量降低了 0.2%;此后的第二阶段,含水量缓慢降低,阴天气候 7 d 后,即开始日照前的 2月13日含水量降到 26.7%,此阶段含水量降低了 2.7%。随后的第三阶段,模拟日照 7 d,含水量降到了 26.0%,含水量降低了 0.7%。第四阶段为模拟降雨阶段,含水量上升,由模拟降雨前的 26.0%增加到降雨 7 d 后的 28.3%,含水量增加了 2.3%。

最底层的 30#探头,距路堤顶面 1.5 m,从 2004 年 1月30日开始的 28.6%到积水 3 d 后,即 2月1日,历时 72 h 的 33.1%,入渗速度为 20.83 mm/h。此后的积水阶段,含水量基本保持稳定,到 2月6日开始模拟无日照、无降雨的阴天气候条件前的含水量 33.6%,含水量增加了 0.5%。此后的第二阶段,即模拟阴天气候条件,含水量缓慢降低,阴天气候 7 d 后降到 30.0%,即开始日照前的 2月13日,第

二阶段阶段含水量降低了 3.6%。随后的第三阶段,模拟日照 7 d,含水量由日照前的 30.0%降到日照 7 d 后的 29.3%,含水量降低了 0.7%。第四阶段为模拟降雨阶段,含水量上升,由模拟降雨前的 29.3%增加到降雨 7 d 后的 31.9%,含水量增加了 2.6%。

以上分析如表 5 所示。

3.3.2 第三组膨胀土模拟试验结论

- (1) 膨胀土含水量越高,失水速率越快。
- (2) 含水量的变化受深度的影响较大,埋藏较浅,含水量受大气影响越大。
- (3) 第三组与第二组相比,膨胀土体中含水量越大,水的入渗速度越大。

3.4 第四组模型试验

第四组模型测试分为两个阶段,第一阶段为模拟积水阶段前后含水量差,含有 5 个变量,分别是模拟积水开始时的含水量(w_{d1}),水入渗到探头位置时含水量(w_{d2}),前后含水量差(Δw_d),历时(t),水的入渗速度(v);第二阶段为模拟阴天阶段前后含水量差,历时 5 d,含有三个变量,分别是模拟阴天开始时的含水量(w_{c0}),模拟阴天结束时的含水量(w_{c1}),前后含水量差(Δw_c)。

本次试验 25#, 40#, 30#探头的坐标 X, Y 值分别为(0.5, 2.1), (0.5, 1.5), (0.5, 0.9), 其单位均为 m。

水的入渗速度为 1.56 mm/h;第二阶段,模拟阴天阶段前后含水量差,历时 5 d,膨胀土室内模型试验第四组观测数据见图 8;含水量随时间的变化曲线如图 8, 9 所示。

由图 8 可知,距坡顶 30 cm 处的 25#探头,从积水起始含水量的 21.7%,第 3 d 后增大到 21.9%。

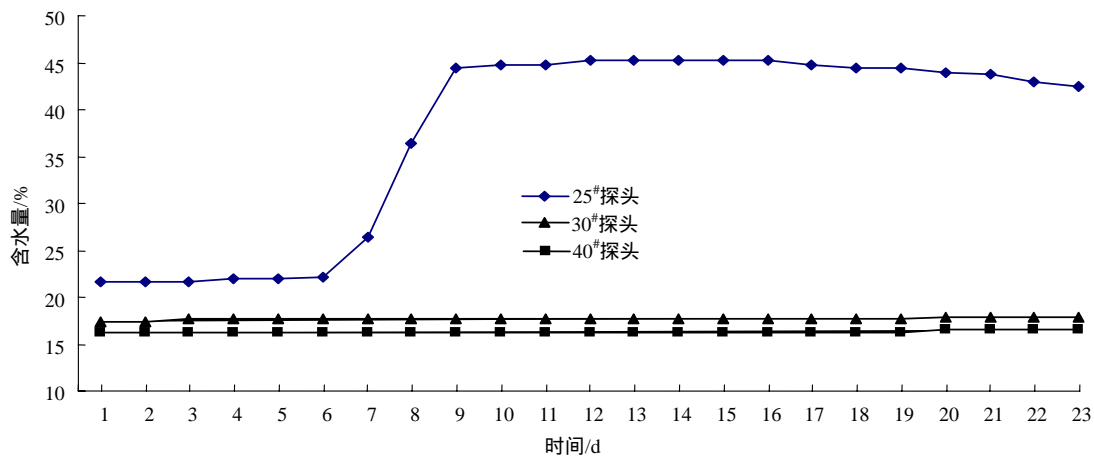


图 8 第四组试验含水量随时间变化曲线

Fig.8 Relationship curves between moisture contents variation and time in the fourth test

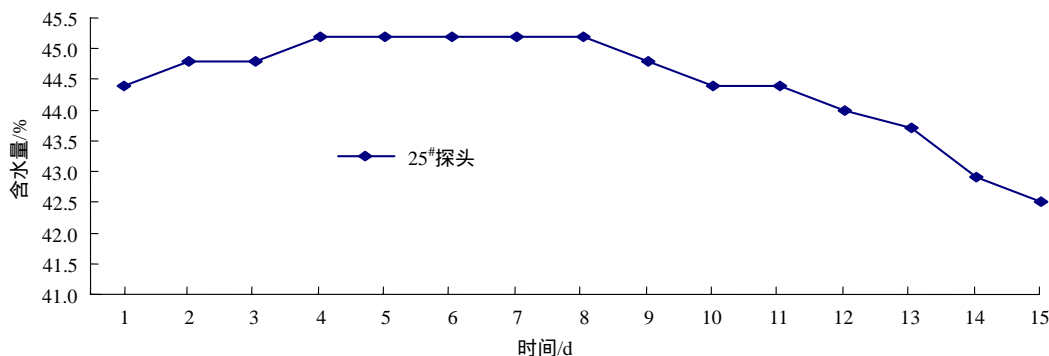


图 9 积水 8 d 后 25#探头所测含水量随时间变化曲线

Fig.9 Relationship curves between moisture contents variation and time for the probe No.25 after 8 days

在积水 8 d 后, 历时 192 h, 25#探头所测的含水量才达到相对稳定的阶段, 含水量为 44.4%, 水的入渗速度为 1.56 mm/h。而 40#和 30#探头所测含水量基本上保持一条直线, 基本没有变化。25#探头含水量在积水后含水量是逐渐上升的趋势的, 随后缓慢的上升到积水后的第 12 d 的 45.2%, 随后保持在 45.2%的一段直线上。停止降雨后, 含水量逐渐下降, 到第四组试验结束时, 即停止降雨的第 5 d 后含水量降到了 42.5%。

比较第四组与第二组试验, 不同的是第二组试验在积水 2 d 后水就渗透到最顶层的含水量探头的位置, 而第四组用了 8 d 的时间; 第二组试验在积水 2 d 后含水量发生突变, 随后在模拟积水的过程中基本保持不变, 而第四组试验在积水后 8 d 后含水量发生突变, 随后直到积水 8 d 含水量增加量都很大, 最后才趋于稳定。

以上分析结果如表 6 所示。

表 6 第四组试验含水量测试结果对比分析

Table 6 Testing results comparative analysis of simulated test of the fourth set

探头编号	第一阶段					第二阶段		
	$w_{d1}/\%$	$w_{d2}/\%$	$\Delta w_d/\%$	t/h	$v/(mm \cdot h^{-1})$	$w_{c0}/\%$	$w_{c1}/\%$	$\Delta w_d/\%$
25#	21.7	44.4	+0.2	192	1.56	44.4	42.5	-1.9
40#	无变化					无变化		
30#	无变化					无变化		

3.5 第五组模型试验

3.5.1 第五组模型试验结果与分析

第五组模型试验数据有第一阶段(从起始含水量到积水入渗到含水量探头位置时含水量的变化)及第二阶段(模拟积水阶段, 前后含水量差)。其中,

第一阶段变量有起始含水量(w_{i1}), 水完全入渗到探头位置(w_{i2}), 含水量差(Δw_i), 历时(t)及入渗速度(v); 第一阶段变量有阴天开始时含水量(w_{c0}), 阴天结束时含水量(w_{c1}), 前后含水量差(Δw_c)。

本次试验 25#, 40#, 30#探头的坐标 X, Y 值分别为(0.5, 2.1), (0.5, 1.5), (0.5, 0.9), 其单位均为 m。

膨胀土室内模拟试验第五组含水量观测数据见图 10, 表 7。

由图 10 所示, 在积水 3 d 后, 即 2004 年 5 月 1 日, 距坡顶 0.9 m 的 40#探头所测的含水量从 16.5% 增大到 16.9%, 说明水已经开始下渗到这一位置。此后, 从 5 月 1 日到 5 月 7 日, 含水量由 16.9% 突增到 40.2%, 水的入渗速度为 $900/[(18 + 10) \times 24] = 1.34$ mm/h, 含水量曲线发生突变, 说明水已经完全渗透到 40# 探头的埋设位置, 此后含水量变化不大。由第四组模型试验结果知道, 25#探头埋设在距路堤顶面 0.3 m 的位置, 水渗透 25# 探头时的平均速度是 1.56 mm/h, 与第二组模型试验渗透到此位置的平均速度 8.33 mm/h 相比, 相差很大, 这与土的类型、探头的埋深、排水边界条件等有关。

积水 19 d 后, 距路基顶 1.5 m 的 30#探头所测的含水量发生突变, 从 17.9% 增大到 18.1%, 说明水已经渗透到 30# 探头所埋设的位置(距路基顶面 1.5 m), 到积水 29 d 后含水量达到 45.5%, 水从坡顶完全渗透到距坡顶 1.5 m 所用时间为 $(18 + 29) \times 24 = 1128$ h, 其入渗速度为: $1500/1128 = 1.33$ mm/h。

3.5.2 第四、五组模拟试验结论

(1) 与排水边界要比, 在不排水边界条件下, 水在膨胀土路基的入渗速度随路基深度的增大而减小。

(2) 南友公路宁明地段中等膨胀土在 90% 压实度条件的入渗速度为 1.33 ~ 1.56 mm/h。

3.6 第六组模拟试验

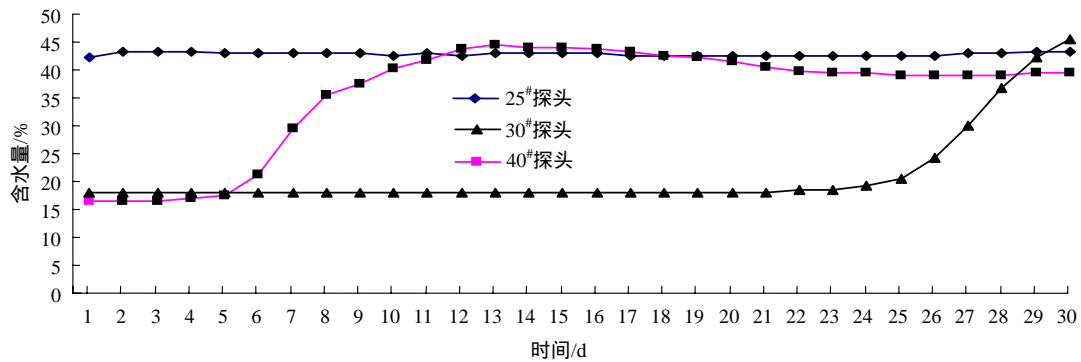


图 10 第五组模型试验含水量随时间变化曲线

Fig.10 Relationship curves between moisture contents variation and the time in the fifth test

表 7 第五组模拟试验含水量测试结果对比分析

Table 7 Testing results comparison of simulated test for the fifth test

探头 编号	起始含水量到积水入渗阶段					第 2 阶段		
	w_{i1} /%	w_{i2} /%	Δw_i /%	t/h	v /($mm \cdot h^{-1}$)	w_{c0} /%	w_{c1} /%	Δw_c /%
25#	变化不大					变化不大		
40#	16.5	40.2	23.7	(18+10) × 24	1.34	40.2	39.4	- 0.8
30#	17.9	45.5	27.6	(18+21) × 24	1.33	45.5	45.2	- 0.3

第六组含水量观测数据见图 11, 表 8。表中数据含有第二阶段(模拟阴天阶段前后含水量差, 共 7 d); 第三阶段(模拟日照阶段前后含水量差, 共 10 d)及第四阶段(模拟降雨阶段前后含水量差, 共 7 d)。其中第二阶段变量有模拟阴天开始时(w_{c0}), 模拟阴天结束时(w_{c1}), 前后含水量差(Δw_c); 第三阶段变量有模拟日照开始时(w_{s0}), 模拟日照结束时(w_{s1}), 前后含水量差(Δw_s); 第四阶段变量有模拟降雨开始时(w_{r0}), 模拟降雨结束时(w_{r1}), 前后含水量差(Δw_r)。

本次试验 25#, 40#, 30#探头的坐标 X, Y 值分别为(0.5, 2.1), (0.5, 1.5), (0.5, 0.9), 其单位均为 m。

由表 8, 图 11 可以看出, 除了埋设在土体最上部的 25#探头外, 其他两个探头在本组试验的三个阶段中, 所测定的含水量都是在逐渐减小的, 只是在模拟阴天和模拟日照这两个阶段中减少很快, 而在模拟降雨阶段中减小得较慢而已。对于 25#探头在开始的两个阶段含水量逐渐减小, 在模拟降雨阶段逐渐增大, 到最后一天突然减小, 这是由于此时由于雨水的冲蚀作用, 25#探头已经裸露在土体的外部。40#探头在模拟降雨的最后一天含水量有所增大。

表 8 第六组试验含水量测试结果对比分析

Table 8 Testing results comparison of simulated test for the sixth test

探头 编号	第 1 阶段			第 2 阶段			第 3 阶段		
	$w_{c0}/%$	$w_{c1}/%$	$\Delta w_c/%$	$w_{s0}/%$	$w_{s1}/%$	$\Delta w_s/%$	$w_{r0}/%$	$w_{r1}/%$	$\Delta w_r/%$
25#	42.5	39.8	- 2.7	39.8	37.9	- 1.9	37.9	42.5	+4.6
40#	39.1	37.2	- 1.9	37.2	35.5	- 1.7	35.5	36.1	+0.6
30#	45.5	42.9	- 2.6	42.9	40.6	- 2.3	40.6	40.2	- 0.4

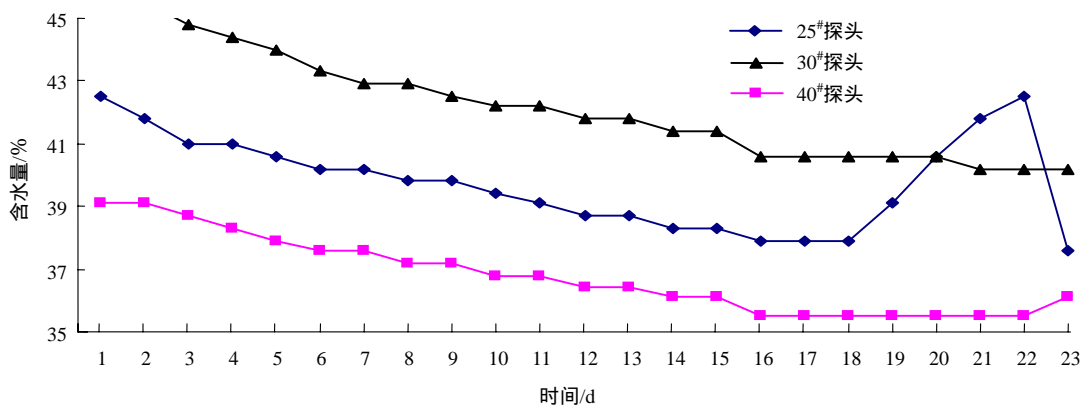


图 11 膨胀土室内模拟试验第六组含水量随时间变化曲线

Fig.11 Relationship curves between moisture contents variation and time in the sixth test

4 结 语

以上通过水在膨胀土路基中的六组模型试验结果及分析,可以得出如下结论:

(1) 在膨胀土路堤中含水量受大气的影 响,且与路堤土的类型、土的密实、排水边界条件关系密切。

(2) 相比较而言,膨胀土路基中水分的蒸发速度慢于入渗速度。

(3) 广西南友公路宁明地段中等膨胀土:密实度为 60%~70%,模拟排水边界条件下,水在路基中的入渗速度为 13.9 mm/h;在 90%压实度条件,模拟不排水边界条件下,水在路基中的入渗速度为 1.33~1.56 mm/h。

(4) 湖南常张公路慈利地段弱膨胀土,在模拟排水边界条件下,在较低含水量(10.1%~13.1%)路堤中,水的入渗速度为 8.33~15.63 mm/h;而在较高含水量(25.3%~28.6%)路堤中,水的入渗速度为 12.50~20.83 mm/h。这一试验结果说明:在排水边界条件下路基中含水量越高,水的入渗速度越大。

(5) 含水量的变化受深度的影响较大,埋藏较浅,含水量的变化受大气影响越大。

(6) 在不排水边界条件下,水在膨胀土路基的入渗速度随路基深度的增大而减小;在排水边界条件下,水的入渗速度随土深度的增大而增大。

(7) 相比较而言,路基中含水量越高,受气候条件影响越明显,水分越容易被蒸发而造成含水量降低;在最优含水量时水分变化相对较慢。

参考文献(References):

[1] 李述训. 土壤中水分迁移问题分析、试验和模拟[博士学位论文][D]. 兰州:中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,1994.(Li Shuxun. Analysis, experiment research and numerical simulation about the problem of moisture migration in soil[Ph. D. Thesis][D]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 1994.(in Chinese))

[2] 胡世雄. 坡度、降雨和土壤条件对坡面流及坡面动力侵蚀过程的影响研究[博士学位论文][D]. 北京:中国科学院地理研究所,1998.(Hu Shixiong. A study on overland flows and dynamic processes of slope erosion as influenced the slope gradient, rainfall and soil[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences, 1998.(in Chinese))

[3] 徐永福. 非饱和膨胀土的结构模型和力学性质研究[博士学位论文][D]. 南京:河海大学,1999.(Xu Yongfu. Study on the structural model and mechanic properties of unsaturated soil[Ph. D. Thesis][D]. Nanjing: Hohai University, 1999.(in Chinese))

[4] Fredlund D G, Morgenstern N R. Stress state variables for unsaturated soils[J]. Geotech. Engng. Div., ASCE, 1997, 103(5): 447-466.

[5] Miller D J, Nelson J D. Osmotic suction as a valid stress state variable in unsaturated soils[A]. In: Wray W K ed. The 2nd Int. Conf. on Expansive Soils[C]. Dallas Texas: [s. n.], 1992. 179-184.

[6] Shen Z J. Reduction suction and simplified consolidation theory for expansive soils[A]. In: Unsaturated Soils[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1995. 1 321-1 326.

[7] 中华人民共和国国家标准编写组. 土工试验方法标准(GB/T50123-1999)[S]. 北京:中国计划出版社,1999.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. Standard for Soil Test Method(GB/T50123-1999)[S]. Beijing: China Planning Press, 1999.(in Chinese))

[8] 中华人民共和国行业标准编写组. 公路土工试验方法标准(TJT051-93)[S]. 北京:人民交通出版社,1993.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. Test Methods for Soils for Highway Engineering(TJT051-93)[S]. Beijing: China Communications Press, 1993.(in Chinese))

[9] 中华人民共和国行业标准编写组. 公路路基设计规范(JTG030-2004)[S]. 北京:人民交通出版社,2004.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. Specification for Design of Highway Subgrades(JTG030-2004)[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.(in Chinese))

[10] 中华人民共和国行业标准编写组. 公路路基施工技术规范(JTJ033-95)[S]. 北京:人民交通出版社,1996.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. Technical Specification for Construction of Highway Subgrades(JTJ033-95)[S]. Beijing: China Communications Press, 1996.(in Chinese))