

文章编号:1671-6833(2008)01-0110-05

膨胀土地区铁路路基拼接离心试验分析

杨海鸣, 宫全美, 周顺华

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200331)

摘 要:旧路拓宽工程往往会涉及到新老路基结合问题. 结合合肥铁路枢纽改造工程, 利用离心模型试验研究路基高度、拼接台阶断面尺寸、新路基边坡率等因素对新老路线的列车安全运营和路基稳定性的影响, 提出适合膨胀土地区的新老路基拼接技术包括设计方法、施工工艺、控制标准等. 将对类似的改扩建工程提供理论支持和示范借鉴, 对铁路的改扩建工程建设具有较大的指导意义和应用价值.

关键词:路基拼接; 膨胀土; 离心模型试验; 不均匀沉降

中图分类号: U 416.2

文献标识码: A

0 引言

当前我国铁路发展十分迅速. 根据铁路“十一五”规划, “十一五”期间, 我国将建设铁路新线 17 000 km, 其中既有线增建二线 8 000 km, 有相当一部分集中在我国东部膨胀土地区一带. 采用老路加宽进行铁路的改扩建工程将是我国本世纪铁路建设所面临的非常重要和必须解决的问题, 随之出现的路基拼接问题也将越来越突出. 在膨胀土地区, 新老路堤的拼接组合, 其加载作用的时间差长达 5 年甚至 10 余年. 由于加载时间不同, 地基受力不均匀, 必然会产生新老路堤的不均匀沉降差^[1]. 沉降不同, 会导致拼接面开裂、路基表面破损, 严重时路堤滑坡.

为了掌握路基的沉降规律, 充分利用现代最新的土工试验手段(土工离心模型试验或大型室内模型试验), 开展系统的室内模型试验, 是国内外在结合工程开展现场综合测试前普遍采用的不可缺少的研究方法之一^[2].

笔者结合合肥铁路枢纽改造工程, 为保证施工期间及投入营运后新老路基稳定、列车运营的安全, 利用离心模型试验模拟, 针对不同台阶尺寸、路基高度和新路基不同的边坡坡率等因素对新老路基的稳定性的影响进行了研究.

1 离心试验设计

1.1 试验断面的选取

针对西安—南京线西安至合肥段的 I 类变更工程, 选取了典型断面(18K5+950~18K8+930)作为试验段. 试验段所处地区为第四系地层所覆盖, 为第四系全新统冲积层(Q_4^{al}), 该层主要物理力学指标: 天然含水量 $W=26.7\% \sim 39\%$; 残余内摩擦角 $\Phi_r=15.9^\circ \sim 31.0^\circ$; 残余黏聚力 $C_r=3.0 \sim 13.0$ kPa; 自由膨胀率 $F_r=40\% \sim 66\%$. Q_4^{al} 层膨胀土其残余内摩擦角均大于 15° , 为弱至中等强度的膨胀土.

1.2 路堤填土的模拟

为了确定该地区路基土体的特性, 并考虑石灰对膨胀土膨胀性特殊的改良效果^[3], 选取了一些典型断面现场取土, 进行了室内的一系列常规试验, 试验结果如表 1. 测试断面: 18K5+950~18K8+930. 路堤填土将分老路堤和新路堤填土分别模拟. 老路堤的模拟根据其室内配土试验进行配土, 配土试验按正交试验^[4]设计, 结果见表 2. 控制标准为含水量、容重、压缩模量和无侧限抗压强度. 最终确定以第 7 组试验的结果, 作为老路堤的配土指标. 新路堤模型材料按现场击实试验得出的最佳含水量 16.4%、最大干密度 1.78 g/cm³ 配土. 装入特制的制模盒中按配土试验方案击实, 脱模后人工修切成路堤模型.

1.3 地基土的模拟

选取了一些典型断面进行地基土现场的轻型动力触探试验见表 3. 根据试验结果, 在地基表层 1.2 m 范围内的土体的 N_{10} 值取为 25 击, 其对应

收稿日期: 2007-10-08; 修订日期: 2007-12-24

作者简介: 杨海鸣(1979-), 男, 四川南充人, 同济大学博士研究生, 主要从事测绘工程、岩土工程与地下结构的研究, E-mail: yanghaiming1979@sina.com.

承载力为 180 kPa^[5]。根据室内配土试验,最终确定以第 6 组试验的结果作为地基表层 1.2 m 范围内的土层。地基土下部土层按合肥地区膨胀土的性质^[6](含水量 28%、干密度 1.68 g/cm³)模拟。

根据计算,在 30 m 深度处,列车荷载所产生的附加应力已衰减至 10% 以下,变形很小,所以地基土层厚度确定为 30 m。

表 1 原状土试验结果
Tab. 1 The undisturbed soil test result

里程	试验序号/次	压缩模量/MPa	含水量/%	干容重/(kN·m ⁻³)	无侧向抗压强度/kPa
18K5+950	1	7.692	31.16	1.521	140.0
18K6+450	2	5.263	31.54	1.487	111.1
18K8+500	3	7.143	29.28	1.534	109.2
18K8+930	4	6.452	28.07	1.555	61.0

表 2 配土试验结果
Tab. 2 The manipulated soil test result

试验 次数	配方	配比	击数	平均容重 /(kN·m ⁻³)	干容重 /(kN·m ⁻³)	压缩模量 /MPa	无侧向抗压 强度/kPa
1	石灰:水:土	4%:31%:1	分 5 层,每层 15 击	1.865	1.417	8.696	87.8
2	石灰:水:土	4%:28%:1	分 5 层,每层 25 击	1.937	1.613	7.774	148.6
3	石灰:水:土	4%:25%:1	分 5 层,每层 15 击	2.331	1.745	9.10	198.0
4	石灰:水:土	2%:31%:1	分 5 层,每层 25 击	1.843	1.402	8.411	78.2
5	石灰:水:土	2%:28%:1	分 5 层,每层 15 击	1.889	1.580	7.568	121.2
6	石灰:水:土	2%:25%:1	分 5 层,每层 25 击	2.137	1.622	8.774	178.7
7	水:土	28%:1	分 5 层,每层 25 击	1.944	1.596	7.721	112.3
8	水:土	31%:1	分 5 层,每层 15 击	1.937	1.513	3.774	48.6
9	水:土	25%:1	分 5 层,每层 25 击	1.984	1.585	7.407	124.1

表 3 轻型动力触探试验结果
Tab. 3 The light dynamic penetrometer test result

里程	0 ~ 30 ~	60 ~	90 ~	120 ~	150 ~	
	30 cm	60 cm	90 cm	120 cm	150 cm	180 cm
18K5+950	36	28	25	28	44	35
18K6+450	18	23	23	21	19	31
18K8+500	26	25	25	25	31	—
18K8+930	25	27	25	—	—	—

1.4 列车及轨道荷载的模拟

列车及轨道荷载简化静荷载模型,根据《新建时速 200 km 客货共线铁路工程施工质量验收暂行标准》的规定,对于速度 200 km/h 的情况,列车及轨道荷载,可用宽度 3.4 m,高度 3.0 m,重度 18 kN/m³ 的土柱代替,针对不同路堤模型,对土柱的尺寸按照相应模型率分别进行缩放。

1.5 模型率的选取

根据试验设计的目的,路堤的实际尺寸,并结合 L-30 土工离心机的工作条件,试验拟模拟路堤横平面,模型率根据路基断面尺寸、地基压缩层厚度、边界条件及模型箱尺寸综合考虑后确定,且必须满足路基坡脚至箱壁的距离不少于 2 倍路堤

高度的要求^[7]。

根据以上因素综合考虑,高度为 3.0 m、6.0 m 和 10.0 m 的路堤的试验模型率分别选用 1:65、1:100 和 1:140。

1.6 时间的换算

离心模型试验中采用的时间相似参数为 C_t ,
$$= \frac{t_p}{t_m} = N^{\beta[8]}$$
。对于土体的长期蠕变,根据勘察资料给出的各土层的液限、含水量、液性指数等指标,通过 $\beta = 1 + uI_L^{[9]}$ 可以得出 β 。计算得到模型时间与原型时间的换算关系: $t_m = t_p / N^{1.80}$ 。

1.7 试验模型设计

新老路堤的拼接对路堤稳定性的影响因素很多,笔者主要考虑了不同路基高度、不同台阶尺寸、新建线路路堤不同的边坡率以及降水对新老路堤稳定性的影响。

根据上述的试验目的、研究内容,本次共设计了 8 组离心试验模型,试验结果见表 4。

1.8 试验过程

试验时通过同步摄像系统对模型在试验中的全过程进行监控,并拍摄模型的照片。用专用的软

件处理照片数据,以获取所需要的位移点数据.

表 4 土工离心试验模型设计表

Tab. 4 The centrifugal modeling test design

编号	台阶尺寸	新路基 边坡率	水的 影响	路基 高度/m	模型 率
1	高 1.0 m,宽 1.5 m	1:1.5	无	3	1:65
2	高 1.0 m,宽 1.5 m	1:1.5	无	6	1:100
3	高 1.0 m,宽 1.5 m	1:1.5	无	10	1:140
4	高 2.0 m,宽 3.0 m	1:1.5	无	10	1:140
5	高 3.0 m,宽 4.5 m	1:1.5	无	10	1:140
6	高 3.0 m,宽 4.5 m	1:1.5	①	10	1:140
7	高 3.0 m,宽 4.5 m	1:1.2	无	10	1:140
8	高 3.0 m,宽 4.5 m	1:1.1	无	10	1:140

注:①为模拟年降水量 1 000 mm,降水 3 年.

2 试验结果分析

2.1 不同台阶尺寸对老路堤的影响

最常用的开挖方式包括两种:一种是先削坡再挖成台阶状,另一种是直接挖成台阶,本文研究了前一种情况.既有线路堤台阶开挖,直接影响到施工进度和成本.台阶尺寸越大,施工进度越快,施工成本也越低,但在开挖过程中过大的台阶尺寸将直接影响到老路基的稳定性,甚至威胁既有线的行车安全,适当的台阶尺寸能在维持既有线路基稳定的情况下,有效的减低施工成本,加快施工进度.路堤越高,台阶尺寸变化影响也越明显.所以本次试验针对 10.0 m 高路堤,选取了高 1.0 m、宽 1.5 m,高 1.5 m、宽 2.25 m 和高 3.0 m、宽 4.5 m 3 种台阶形式,模拟在开挖填筑施工过程中,不同台阶尺寸对路堤稳定性的影响.其试验结果如表 5 和表 6 所示.

表 5 不同台阶尺寸在开挖过程中对老路堤的影响

Tab. 5 The effect correlation of different pedestal site size on old subgrade during excavation slop

台阶高 度/m	老路基面 最大隆起	老路基面左 右轨差异	地基面最 大隆起
	量/mm	沉降/mm	量/mm
1.0	0.6	0.1	0.8
2.0	0.9	0.1	1.1
3.0	1.9	0.3	2.3

注:老路基面和地基面的最大隆起均在拼接位置处.

试验结果表明:一次性施工的台阶断面尺寸越大,其引起的老路基面、地基面沉降和老路基面两轨道处的差异沉降越大,越不利于老线的行车安全.其原因是台阶断面尺寸的增大,一次开挖和

填筑的面积大,导致等量的卸载和加载的速度快,对老路基土体结构的扰动大,因此产生较大的变形.小台阶、小尺寸的开挖和填筑将减小路基面的沉降及差异沉降.由变化趋势可知:对于 10.0 m 高路堤,一次性开挖高度 1.5 m 以下(即台阶高度 1.5 m 以下)可使两轮轨下的差异沉降满足速度 200 km/h 轨道平顺度 3 mm 的标准.

表 6 不同台阶尺寸在拼接完成后对老路堤的最终影响

Tab. 6 The effect correlation of different pedestal site size on old subgrade during excavation slop

台阶高 度/m	老路基面 最大沉 降/mm	老路基面左 右轨差异 沉降/mm	地基面 最大沉 降/mm
1.0	9.4	1.3	14.9
2.0	10.3	3.8	16.8
3.0	12.6	4.6	20.1

注:老路基面及地基面的最大沉降出现在拼台阶拼接位置处.

2.2 不同路基高度的影响

不同的路基高度,直接影响初始应力场和填筑新线路基的荷载,按照应力释放和叠加原理,将对老路基的路基面的沉降速率和沉降量的影响不同,最终将造成老路基上的轨道不平顺性,影响老线的正常行车安全,因此有必要进行多个路基高度的试验,从而评价施工阶段对各个路基高度的路基面的差异沉降影响,指导相应路基高度的施工.

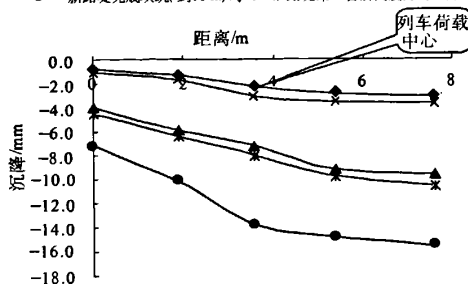
(1)施工阶段.针对施工期,试验对 6.0 m 和 10.0 m 两种高度的路堤进行了模拟,台阶尺寸统一采用高 2 m、宽 3 m.试验结果如图 1.图中坐标零点为远离拼接处的老路基路肩边缘点.

从以上试验结果可以看出,随着路基高度的增加,在新路基填筑过程中,老路基各个位置的竖向变形逐渐增大,但并不与路基高度成线性关系.越靠近新路基的位置,老路基的沉降越大.施工结束时对于 6 m 路堤其两轨道差异沉降量为 3.2 mm,只需稍作处理即可满足速度 200 km/h 轨道平顺度的标准,而对于 10 m 路堤,其两轨差异沉降量为 4.7 mm,远不能满足轨道平顺度的标准,因此施工过程中需对既有线上的行车限速或采取其他措施.

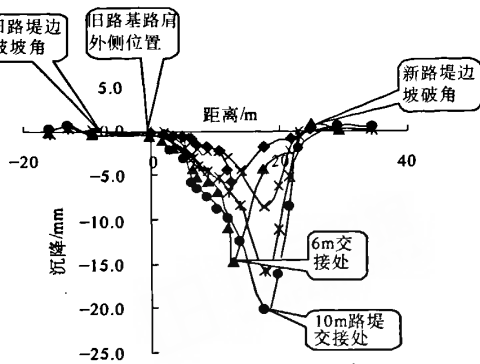
从上述的试验可以判断:高度小于 5 m 的路基在拼接时轨道平顺度能满足 200 km/h 行车的要求,不需采取措施.

(2)针对运营期,对 3 m、6 m 和 10 m 3 种高度的路堤,进行了试验.试验结果如表 7 所示.

- ◆ 新路堤第一次填筑(到2 m)时6 m旧路堤第一台阶高度处的沉降
- ▲ 新路堤完成填筑(至6 m)时6 m旧路堤第一台阶高度处的沉降
- × 新路堤第一次填筑(至2 m)时10 m旧路堤第一台阶高度处的沉降
- ✱ 新路堤填筑到6 m时10 m旧路堤第一台阶高度处的沉降
- 新路堤完成填筑(到10 m)时10 m旧路堤第一台阶高度处的沉降



(a) 老路基面的沉降



(b) 地基面的沉降

图1 不同高度路基施工过程中老路基和地基面的沉降

Fig.1 The settlement of the old subgrade surface and base surface of different height subgrade during construction

表7 不同高度路基运营期的离心试验结果

Tab.7 The centrifugal modeling test result of different height subgrade during the train operation

路基高度/m	荷载作用时间	新路基面最大沉降/mm	老路基面最大沉降/mm	新路基面两轨道下差异沉降/mm	老路基面两轨道下差异沉降/mm
3	瞬时荷载	8.8	7.0	0.5	0.2
	运营3年	15.3	12.0	1.0	1.0
6	瞬时荷载	10.9	9.6	0.7	0.3
	运营3年	25.0	20.3	2.3	2.2
10	瞬时荷载	12.0	10.6	0.9	0.8
	运营3年	27.9	24.2	3.1	2.8

试验结果显示,高度增加,路基的竖向变形增大,3 m、6 m和10 m 3种高度新路堤运营3年后的沉降分别为15.3 mm、25.0 mm、27.9 mm;老路基比新路堤的沉降小3.0 mm左右。路基越高,运营期引起的轨面差异沉降越大。

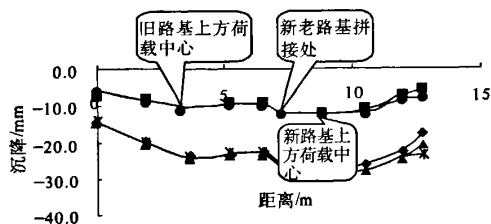
2.3 新路堤边坡率不同的影响

较小的边坡坡率有利于节省工程用地,减小工程投资,但会影响路基的稳定性及变形,容易造成工程事故,所以有必要确定一个合理的边坡率。

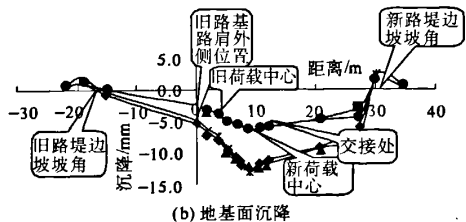
路基高度越高,边坡坡率对路基稳定性影响越明显。因此选取10 m的高路堤进行了研究。本次试验针对铁路运营阶段,分析了新路堤在3种不同边坡率(1:1.5, 1:1.2和1:1.0)的情况下,对新老路堤稳定性的影响,以便确立合理的边坡率,节省用地,节约工程成本。其试验结果见图2。

以上试验结果可以看出,新路堤边坡率变化会对路基变形产生影响,但影响不明显;坡度变陡,路基的竖向变形增大,但变化量很小。坡度每增加一级,路基面竖向变形约增加1 mm。

运营3年后3种坡率的拼接路基拼接处均没有出现裂缝,所以可以适当的加大新路堤的边坡率,节约投资成本。



(a) 路基面的沉降



(b) 地基面沉降

- ◆ 新路堤边坡为1:1.5的10 m路堤第一台阶高度处运营三年后的沉降
- 新路堤边坡为1:1.5的10 m路堤第一台阶高度处在列车荷载下的瞬时沉降
- ▲ 新路堤边坡为1:1.2的10 m路堤第一台阶高度处运营三年后的沉降
- ✱ 新路堤边坡为1:1.2的10 m路堤第一台阶高度处在列车荷载下的瞬时沉降
- × 新路堤边坡为1:1.0的10 m路堤第一台阶高度处运营三年后的沉降
- 新路堤边坡为1:1.0的10 m路堤第一台阶高度处在列车荷载下的瞬时沉降

图2 不同新路堤边坡率运营阶段路基面和地基面的沉降

Fig.2 The settlement of the subgrade surface and base surface of different rate of new slope during the train operation

试验结果显示,由于水的作用使得土体的压缩模量、抗剪强度等降低,降水以后的路基面沉降量显著增加,降水引起的路基面最大沉降增量约为20 mm,地基地面10 mm,两轨面下的差异沉降增加约1~2 mm.降水以后的路堤,新老路基两不满足轮轨下的差异沉降满足速度200 km/h轨道平顺度的标准(见表7),需要进行加固处理.

3 结论

(1)拼接施工引起的路基面最大沉降点位于新老路基搭接处,新线运营后对老线变形影响的最大点也是该点,因此应在施工或长期运营中加强对该点的养护维修管理.

(2)拼接的路基高度增加,既有路基面沉降及差异沉降增大;但变形的增加值并不与路基高度的增加成正比,即随着路基高度的增加,路基变形的增加值成减缓趋势.高度大于5 m的路基在拼接施工时应限速至200 km/h以内或采取路基加固措施等.

(3)小台阶、小尺寸的开挖和填筑将减小路基面的沉降及差异沉降,一次性开挖台阶的尺寸主要受控于路基变形对既有线的影响,路基高度越高,一次性开挖的台阶尺寸应越小.

(4)1:1.0,1:1.2,1:1.5 3种坡率的拼接路基施工及运营3年后路基稳定性满足要求,拼接处均没出现裂缝,但坡率改变将对路基的变形产

生影响,因此合理坡率的选取主要是由施工及运营后的轨道不顺顺决定的.

参考文献:

- [1] 柴玉卿.高速公路路基拼接时的地基处理设计与施工[J].交通科技,2005,(5):6-8.
- [2] 杜延龄.土工离心模型试验基本原理及其若干基本模拟技术研究[J].水利学报,1993,(8):19-27.
- [3] 张季如,徐三峡.石灰和粉煤灰膨胀土路基的压实特性研究[J].武汉理工大学学报,2002,24(9):27-30.
- [4] 姚祖康.公路设计手册:路面[M].北京:人民交通出版社,1999.
- [5] ZHOU SH H. Characterization of subsurface soil with the help of portable dynamic penetrometer with variable energy of type Panda(in French) [D]. France: Blaise Pascal University,1979.
- [6] 廖世文.膨胀土与铁路工程[M].北京:中国铁道出版社,1984.
- [7] SCHOFIELD A N. Cambridge geotechnical centrifuge operation[J]. Geotechnique, 1981,30(3):227-268.
- [8] 包承纲.我国离心模拟试验技术的现状和展望[J].岩土工程学报,1991,13(6):92-97.
- [9] TAYLOR R N. Geotechnical Centrifuge Technology [M]. Blackie Academic & Professional, 1995.
- [10] 周志刚,郑健龙.老路拓宽设计方法研究[J].长沙交通学院学报,1995,11(3):50-56.

The Analysis of Centrifugal Modeling Test of Railway Bed Conjunction to Expansive Soil

YANG Hai-ming, GONG Quan-mei, ZHOU Shun-hua

(Key Laboratory for Highway and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200331, China)

Abstract: Widening subgrade always concerns how to conjunct between old formation and new one. Considering the key modification project of Hefei railway, the influence of different subgrade heights, shoulder sizes, slope ratio of new subgrade, and precipitation etc on the safety operation and subgrade stability of old and new routes is researched. At last, the conjunction technology in expansive soil zone including design, construction process, control criterion is provided. It has both theoretical and practical value for the similar engineering constructions.

Key words: subgrade conjunct; expansive soil; centrifugal modeling test