

文章编号: 1006 - 2106(2011) 12 - 0040 - 05

高速铁路浸水路基长期稳定性试验分析^{*}

陈尚勇 孙红林^{**}

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430063)

摘要: 研究目的: 与一般路基相比, 浸水路基在水流冲击、淘刷、侵蚀及水对路基填土的软化、水位升降等不利作用下, 经列车循环荷载的长期作用, 其稳定性更易受到威胁。为此, 开展了高速铁路无砟轨道路基浸水条件下的循环荷载动态试验, 进行了路基动应力、弹性变形、塑性变形、动孔压、自振频率等测试分析, 以评价浸水路基的长期稳定性, 验证设计方案的可靠性、合理性。

研究结论: 按时速 350 km CRTS II 型板式无砟轨道浸水路基的受力边界条件, 建立了动态试验系统。在试验 9 ~ 13 kPa 的动应力条件下, 经过 550 万次的动载作用后, 基床内动应力、动孔压、弹性变形处于比较稳定的状态, 塑性变形为 0.48 ~ 0.56 mm。从扫频试验结果来看, 路基的自振频率比列车动载作用频率大很多, 不会产生共振现象; 振后路基的自振频率减小幅度很小, 路基性能保持良好。试验设计采用的浸水路基防护、填筑方案是可行的, 长期浸水条件下其性能稳定, 能够满足无砟轨道对基床强度及变形的要求。

关键词: 高速铁路; 浸水路基; 长期稳定性; 动态试验

中图分类号: U213.1 文献标识码: A

Experimental Analysis of Long - term Stability of Soaking Subgrade for High Speed Railway

CHEN Shang - yong, SUN Hong - lin

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Co. Ltd, Wuhan, Hubei 430063, China)

Abstract: Research purposes: Compared with general subgrade, the long - term stability of soaking subgrade would be threatened when it suffered flow impact, scour, erosion, water softening of the roadbed fill, adverse effects of water level change and cyclical loading by train. So a dynamic experiment system is built to study the behavior of soaking subgrade under cyclical loading by train for high speed railway. Then, some testing indexes containing subgrade dynamic stress, elastic deformation, plastic deformation, dynamic pore water pressure, the natural frequency and so on are analyzed. At last, the long - term stability of the soaking subgrade is evaluated and the reliability and reasonableness of the design scheme is verified.

Research conclusions: A dynamic test system is established according to the loading boundary conditions of soaking subgrade paved with CRTS II slab ballastless track for a top speed of 350 km/h. After 5.5 million times dynamic loading of 9 ~ 13 kPa, the dynamic stress, the dynamic pore pressure and the elastic deformations of the roadbed are in stable states and the plastic deformation is 0.48 ~ 0.56 mm. The results of the sweeping frequency test indicate that the resonance will not happen as the natural vibration frequency of the subgrade is more than train's dynamic loading frequency and the subgrade keep good performance because the natural vibration frequency decreases less after the dynamic test. The design of the experiment about soaking subgrade protection and filling is feasible. The long - term

^{*} 收稿日期: 2011 - 07 - 01

^{**} 作者简介: 陈尚勇, 1977 年出生, 男, 高级工程师; 孙红林, 1973 年出生, 男, 教授级高级工程师。

soaking subgrade has stable performance and can meet the strength and deformation requirements of the roadbed with ballastless track.

Key words: high speed railway; soaking subgrade; long-term stability; dynamic experiment

路基作为上部无砟轨道结构的基础,其在承载能力极限状态和正常使用状态下的长期稳定性必然会影响到高速铁路的安全、平顺运行。在江南地区,高速铁路路基不可避免经过水塘,此时就必须按浸水路基考虑。与一般路基相比,浸水路基在水流冲击、淘刷、侵蚀及水对路基填土的软化、水位升降等不利作用下,经列车循环荷载的长期作用,其稳定性更易受到威胁。以往研究成果表明^[1],激振试验可以真实地反映高速列车动荷载作用。为此,按时速 350 km CRTS II 型板式无砟轨道参数建立了动态试验系统,采用激振试验测试浸水路基在列车循环荷载长期作用下的工作性状,以评价其长期稳定性和工程处理方案的合理性。

1 试验方案

1.1 设计方案

经综合比选,选择京沪高速铁路蚌埠站以南 DK 849 + 500 ~ + 600 作为试验工点。工点路堤填高约 4 m,边坡坡率 1 : 1.5,防护标高处设 3 m 宽平台,平台下部边坡坡率放缓至 1 : 1.75,防护标高以下边坡采用 0.3 m 厚干砌片石防护。地基采用 CFG 桩处理,桩长 6.5 m,间距 1.8 m,桩径 0.5 m;桩顶设桩帽,直径 1.0 m,其上铺 0.6 m 厚碎石垫层,垫层内铺设一层土工格栅,抗拉强度不小于 100 kN/m。设计横断面如图 1 所示,模拟试验浸水至路基面以下 0.4 m。

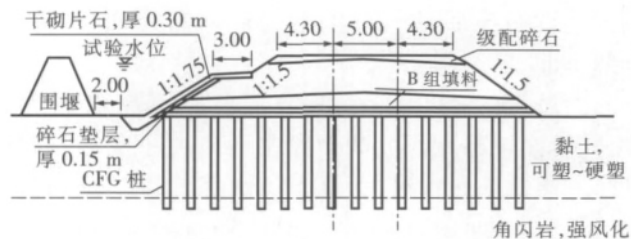


图 1 横断面设计图(单位: m)

1.2 路基填料及压实质量

路基填料为全风化~弱风化花岗岩,颗粒级配曲线如图 2 所示。按照分类^[2],该填料属于级配不良的砾砂(B 组填料),其中细粒($d \leq 0.075$ mm)含量为 13.5%。击实试验结果表明,填料最大干密度为 2.08 g/cm^3 ,最佳含水量 10.2%。填筑质量检测结果,填料的 K_{30} 值为 185 ~ 252 MPa/m, E_{v2} 值为 108 ~ 176 MPa,孔隙率为 13% ~ 19%,满足规范^[1]的要求。

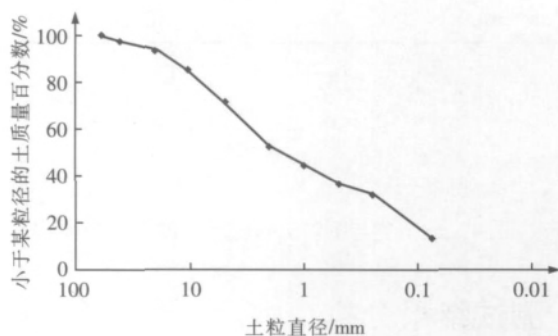


图 2 颗粒级配曲线

1.3 试验测试方案

试验工点左侧为水塘,路堤左侧坡脚外 2 m 设置围堰,保证水面标高维持在基床表层底面处。试验测试断面为 DK 849 + 557、DK 849 + 575,为进行对比并验证浸水效果,DK 849 + 557 断面在路基内分层设置了透水管,水可以通过透水管进入路基内部;DK 849 + 575 断面不设置透水管。孔压测试表明,两个断面都测出了正常的数值,说明即使不埋设透水管,水也能浸入 DK 849 + 575 断面,可以真实反映路基长期浸水状况。

动态试验系统充分模拟了 CRTS II 型板式无砟轨道条件下路基的受力特点。承台板采用现浇钢筋混凝土,其刚度介于支承层与轨道板之间,可模拟轨道结构的整体综合刚度;两个测试断面的承台板尺寸分别为 $6.45 \text{ m} \times 3.25 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ (DK 849 + 557) 和 $4.9 \text{ m} \times 3.25 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ (DK 849 + 575),其尺寸在符合无砟轨道结构基础上,可满足动荷载的输出要求,即承台下方路基面动应力基本处于无砟轨道列车实车运行产生的动应力范围 10 ~ 20 kPa 之间,与已经开通的京津高速、武广客专等实测动应力基本相同。路基内动孔压传感器竖直方向位置及平面位置如图 3 所示,压力盒与沉降板布置如图 4 所示。

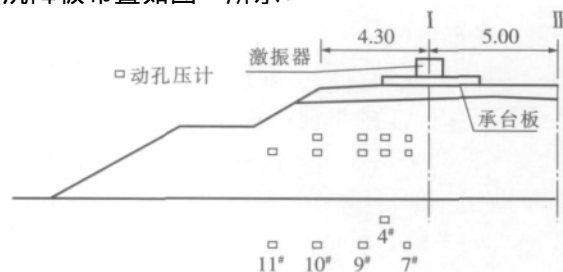


图 3 动孔压传感器布置示意图(单位: m)

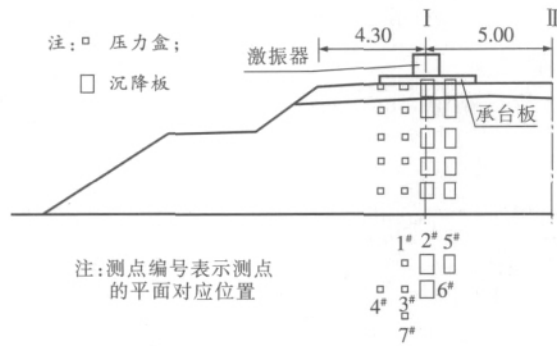


图4 压力盒与沉降板布置示意图(单位: m)

2 测试结果分析

2.1 动应力测试

DK 849 + 557 断面路基面施加的动应力为 10 ~ 13 kPa, DK 849 + 575 断面为 9 ~ 11 kPa。动应力随深度的衰减曲线如图 5 所示。基床表层底面(0.4 m 深度)处动应力衰减系数 $\eta = 0.88 \sim 0.91$, 基床底层底面(2.7 m 深度)处动应力衰减系数 $\eta = 0.48 \sim 0.52$ 。与有砟轨道相比,基床内动应力幅值明显减小,但是动应力沿深度衰减较慢,这反映出整板式无砟轨道的受力特点,沿线路纵向无砟轨道对动应力的扩散会更远,因而路基基床的动应力较小,但是较远的扩散距离(纵向较长的荷载长度)也导致了动应力沿深度方向的衰减较慢。

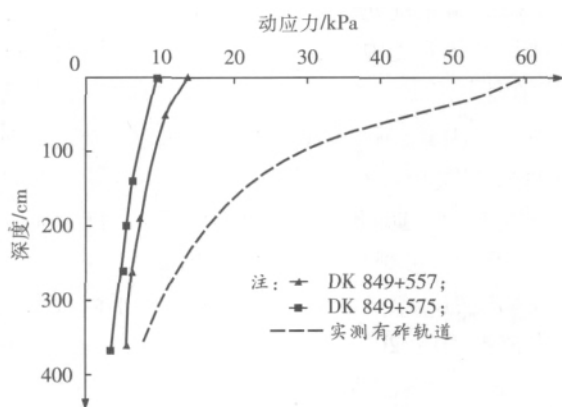


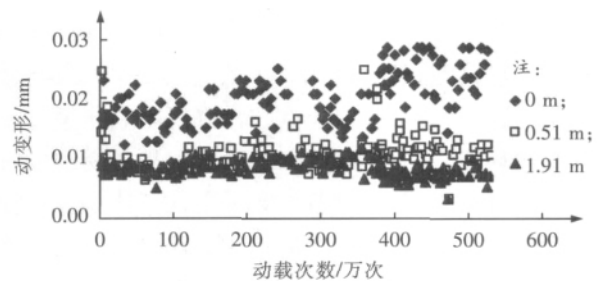
图5 实测动应力衰减曲线

2.2 基床变形测试

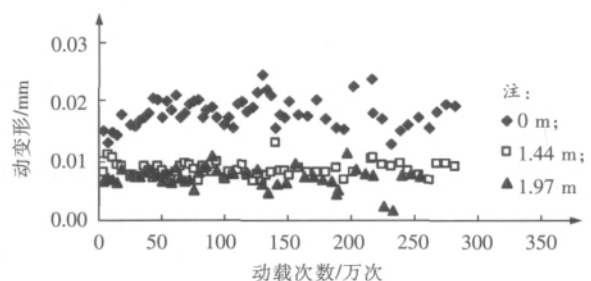
路基基床的变形直接影响到行车的舒适性与安全性,是表征基床性能的重要指标。激振试验测出的基床弹性变形曲线如图 6 所示。变形随振动次数变化不大,较为稳定,最大弹性变形分别为 0.030 mm 和 0.025 mm,处于较低水平,对轨道结构影响极小。

DK 849 + 557 断面振动 380 万次以内,路基面的弹性变形基本分布在 0.012 ~ 0.025 mm 的范围内。

在 380 万次左右增大动应力,弹性变形随之增加。调整后路基面的弹性变形最大为 0.03 mm,路基面以下 0.51 m 深度处的弹性变形在 0.01 mm 左右,1.91 m 处的弹性变形在 0.008 mm 左右。DK 849 + 575 断面振动 280 万次,路基面的弹性变形最大为 0.025 mm,路基面以下 1.44 m、1.97 m 处弹性变形主要分布在 0.004 ~ 0.01 mm 范围内,最大为 0.013 mm。



(a) DK 849+557



(b) DK 849+575

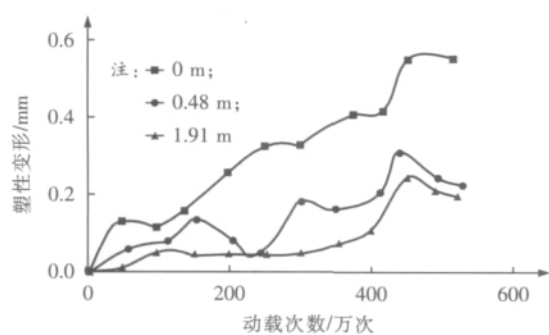
图6 弹性变形-动载次数关系图

基床内不同深度的累计塑性变形随振动次数的变化情况如图 7 所示。振动 400 ~ 450 万次后,塑性变形趋于稳定;经 600 万次动载以后,总变形较小,两个断面连续激振后基床总塑性变形分别为 0.56 mm、0.48 mm。

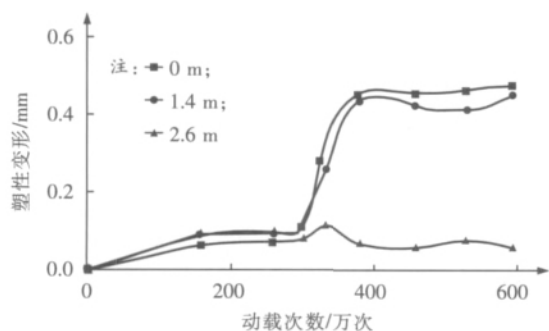
经过 550 ~ 600 万次动载作用表明,基床总变形很小,并且比较稳定。两断面路基面最大总变形(弹性变形 + 塑性变形)分别为 0.59 mm 和 0.51 mm,只占设计预留 5 mm^[2] 的 10.2% ~ 11.8%。因此可以认为路基浸水条件下列车循环荷载产生的弹性变形和塑性变形对轨道平顺性无影响。

2.3 动孔压测试

浸水路基本除承受自重和列车荷载外,还承受水的浮力和动水压力,填料的强度会下降,边坡的稳定性也会受到一定程度的削弱,动孔压是评价和分析路基稳定性的重要指标之一。DK 849 + 557 和 DK 849 + 575 断面承受 550 万次动载过程中,动孔压测试结果及规律基本相近,动孔压随振动次数略有波动,总体上较为稳定。



(a) DK 849+557



(b) DK 849+575

图 7 不同深度处塑性变形曲线

图 8 为 DK 849 + 557 断面路基面以下不同深度处的动孔压 - 动载次数曲线。4[#]测点 1.76 m 深度处动孔压值为 0.6 ~ 0.9 kPa。2.46 m 深度处的动孔压值为 0.3 ~ 0.45 kPa。图 9 为 I 线左侧 0.9 m 处动应力/动孔压 - 动载次数曲线,同一位置处动应力远大于动孔压值,1.8 m 深度处动孔压平均值与动应力平均值的比值为 0.084,2.5 m 深度处为 0.054,说明动应力绝大部分由填料来承担。

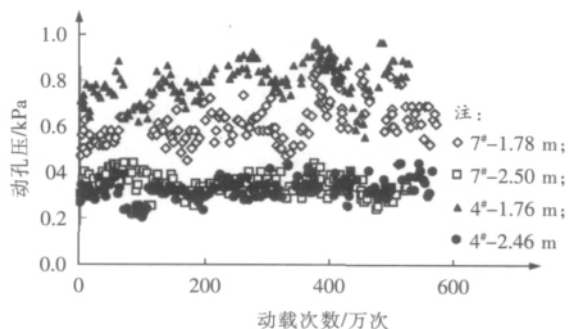
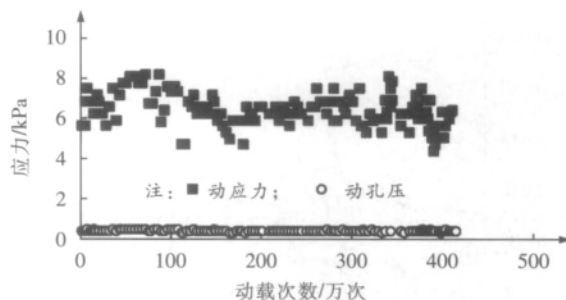


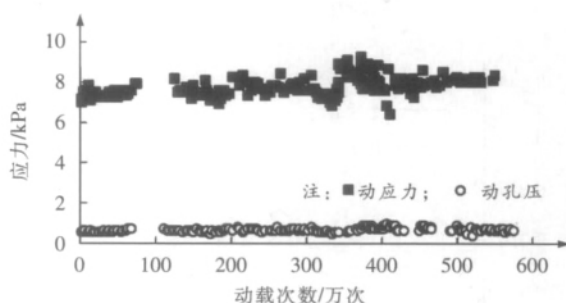
图 8 动孔压 - 动载次数关系图(DK 849 + 557)

DK 849 + 575 断面测试结果与 DK 849 + 557 类似,7[#]测点处测出的动孔压约为 0.4 kPa(2.0 m 深度)和 0.22 kPa(2.61 m 深度),动孔压与同位置动应力的比值分别为 0.074 和 0.044。

测试数据还表明,混凝土承台板以外的测点,其动



(a) 1.8 m 深度



(b) 2.5 m 深度

图 9 动应力/动孔压 - 动载次数关系图(DK 849 + 557)

孔压值明显小于承台板下方的动孔压值,距离越远越小。

2.4 扫频试验

在对路基进行连续激振前、后进行了扫频试验,振幅 - 频率曲线如图 10 所示。幅频曲线显示,DK 849 + 557 断面振前 27 Hz 左右振幅最大,振后 26 ~ 27 Hz 左右振幅最大,DK 849 + 575 振前 24 ~ 28 Hz 左右振幅最大,振后 24 ~ 27 Hz 左右振幅最大。

铁路路基承受的列车荷载是单向脉冲应力波。同一车厢的两个转向架之间的距离一般是 18 m,相邻两节车厢的转向架间距一般是 8 m,当车速为 350 km/h 时,动载叠加频率分别为 5.4 Hz、12.2 Hz。路基激振前后的最小自振频率为 24 Hz,比列车动载作用频率大很多,路基不会产生共振现象。

激振试验以后路基的自振频率基本未变化,这表明本次动载试验对路基本身结构的影响极为有限,浸水路基在循环荷载作用下,性能保持较好。

3 结论

(1) 动态模拟试验充分考虑了时速 350 km CRTS II 型板式无砟轨道浸水路基的受力边界条件,试验方案能够真实反映浸水路基的在列车循环荷载长期作用下的工作性状。

(2) 在所施加的应力水平下,经过 550 万次的动载作用后,总体上基床内动应力、弹性变形、动孔压处

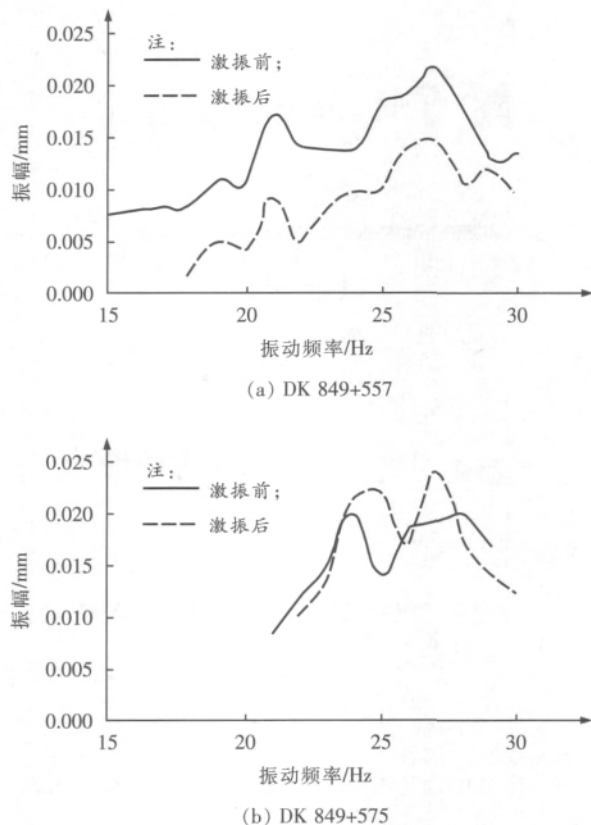


图10 激振前后振幅-频率对比曲线

于比较稳定的状态。与有砟轨道相比,无砟轨道基床内动应力沿深度衰减较慢,但其动应力幅值明显小于有砟轨道路基;动孔压值总体较小,两个测试断面最大不超过0.9 kPa,约占动应力的4.4%~8.4%,不会影响路基的长期稳定性;两个断面的最大弹性变形为0.03 mm、0.025 mm,塑性变形为0.56 mm、0.48 mm,总变形约为设计预留值的10.2%~11.8%,不会影响无砟轨道的长期使用。

(3) 从扫频试验结果来看,路基的自振频率比列车动载作用频率大很多,不会产生共振现象;与激振试验前相比,振后路基的自振频率减小幅度很小,表明本次动态试验对路基本身结构的影响极为有限,路基性能能保持良好。

(4) 试验设计采用的浸水路路基防护、填筑方案是可行的,长期浸水条件下其性能稳定,能够满足无砟轨道对基床强度及变形的要求。

参考文献:

- [1] TB 10621—2009 高速铁路设计规范(试行) [S].
TB 10621—2009, Code for Design of High Speed Railway [S].

- [2] TB 10001—2005 铁路路基设计规范 [S].
TB 10001—2005, Code for Design on Subgrade of Railway [S].
- [3] 顾湘生. 客运专线路基工程几个问题的讨论 [J]. 铁道工程学报 2005(1): 31—38.
Gu Xiangsheng. Discussion on Some Issues in Construction of Subgrade of Passenger Dedicated Line [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2005(1): 31—38.
- [4] 朱忠林, 马伟斌, 韩自力. 新建铁路路基改良土动力学试验研究 [J]. 中国铁路 2007(5): 51—53.
Zhu Zhonglin, Ma Weibin, Han Zili. Experimental Study on Dynamic Characteristics of Improved Soil in New Railway Subgrade [J]. Chinese Railway 2007(5): 51—53.
- [5] 朱忠林, 马伟斌, 史存林. 合宁线试验段路堑基床地基动力特性试验研究 [J]. 铁道建筑 2007(2): 55—58.
Zhu zhonglin, Maweibin, Shi Cunlin. Experimental Study on Dynamic Characteristics of Cutting Roadbed in He—Ning Railway Test Section [J]. Railway Engineering, 2007(2): 55—58.
- [6] 郑大为, 王炳龙, 周顺华, 等. 合宁快速客运专线膨胀土不同刚度路堤振动特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006(S2): 4204—4208.
Zheng Dawei, Wang Binglong, Zhou Shunhua etc. Study on Vibration Character of Expansive Soil Embankments with Different Rigidities Along Hefei—Nanjing Rapid Railway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006(S2): 4204—4208.
- [7] 孙红林, 李丹. 京沪高速铁路路基工程主要技术标准研究 [J]. 铁道建筑, 2009(7): 5—10.
Sun Honglin, Li Dan. Mainly Technical Standard Research on The Beijing—Shanghai High—Speed Railway Subgrade Engineering [J]. Railway Engineering, 2009(7): 5—10.
- [8] 李丹. 京沪高速铁路徐沪段路基填料利用方案研究 [J]. 高速铁路技术 2010(1): 54—56.
Li Dan. One Plan of Utilizable Subgrade Filling in Xuzhou—Shanghai Section of Beijing—Shanghai High—Speed Railway. High—Speed Railway Technology [J]. 2010(1): 54—56.
- [9] A. Gomes Correia, Heinz Brandl. Geotechnics for Roads, Rail Tracks and Earth Structures [M]. Netherlands: A. A. Balkema, 2001.

(编辑 梅志山)