

文章编号:1671-1637(2012)01-0019-06

非埋式桩板结构路基承载机制

苏 谦^{1,2}, 王武斌², 白 皓², 廖 超², 赵 伟²

(1. 西南交通大学 高速铁路线路工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031;

2. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要:为了研究深厚湿陷性黄土地基非埋式桩板结构路基的承载机制,选取试验段典型断面进行元器件布置与长期观测;考虑桩土相互作用,依据等刚度的原则引入综合转动刚度的概念,建立了纵、横向平面分析模型,对非埋式桩板结构的受力与变形特性进行测试分析。实测结果表明:结构主筋应力测试值与理论值相差10%~30%,吻合较好,最大值出现在托梁支座断面上侧,为60.60 MPa;桩侧土体承受约95%的荷载,且未产生负摩阻力;桩板结构的荷载传递规律与传统路基不同,桩基将荷载传递到更深的持力层,改善了路基软弱土体部分的受力状态;轨道结构完工半年后,承台板顶面最大累计沉降出现在中跨跨中断面,为1.0 mm,满足沉降控制要求。

关键词:非埋式桩板结构;深厚湿陷性黄土;现场试验;承载机制;变形特性;荷载传递规律

中图分类号:U213.14

文献标志码:A

Bearing capacity mechanism of non-embedded pile-plank structure subgrade

SU Qian^{1,2}, WANG Wu-bin², BAI Hao², LIAO Chao², ZHAO Wei²

(1. Key Laboratory of High-speed Railway Engineering of Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China; 2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University,

Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: Sensor components were disposed at the typical section of test subgrade, and the bearing capacity mechanism of non-embedded pile-plank structure in deep collapsible loess foundations was studied by long-term observation. The pile-soil interaction was considered, the concept of comprehensive rotation stiffness was introduced based on the principle of equal stiffness, the vertical and horizontal plane models of the subgrade were installed, and the deformation and mechanical characteristic of the structure were analyzed. Measured result shows that the test value of structural main reinforcement stress agree well with the theoretical calculation value, the difference is about 10%-30%, and the maximum reinforcement stress of 60.60 MPa appears at the cross section of joist. Pile side earth bears about 95% of total load, and no negative friction is produced. The load transfer law of the structure is different from that of traditional subgrade, load can be transferred to deeper bearing layer by pile foundation, which improves the stress state of soft soil section. Half a year, after the laying completion of track construction, the largest accumulated settlement of top surface for bearing plank occurs at the cross section of mid-span, which is 1.0 mm, and meets the requirement of settlement control. 1 tab, 12 figs, 15 refs.

收稿日期:2011-09-12

基金项目:铁道部科技研究开发计划重点项目(2006G004-B, 2008G031-C);中央高校基本科研业务费专项资金项目(SWJTU09CX004)

作者简介:苏 谦(1972-),男,山西芮城人,西南交通大学教授,工学博士,从事铁路路基结构研究。

Key words: non-embedded pile-plank structure; deep collapsible loess; field test; bearing capacity mechanism; deformation properties; load transfer law

Author resume: SU Qian(1972-), male, professor, PhD, +86-28-87602673, suqian@126.com.

0 引 言

列车速度的提高对铁路路基的强度、刚度和稳定性提出了更高的要求,因此,在复杂地基路段需要利用特殊结构^[1]。中国黄土高原地区修建客运专线遇到了“深厚湿陷性”的挑战,适用于湿陷性黄土的常用加固方法所能处理的最大深度一般不超过 30 m^[2],难以满足工后沉降的要求,因此,中国在深厚湿陷性黄土地区新建铁路路基首次使用了非埋式桩板结构^[3-5]。非埋式桩板结构路基作为一种新型轨下基础结构,与传统的填筑路基大不相同,上部动静荷载在路基结构中的传递路径发生变化,具有一定的特殊性。遂渝线复合式桩板结构的桩基为端承类桩基^[6],相关的研究内容较为详尽^[7-9]。郑西客运专线桩板结构位于深厚湿陷性黄土地基中,湿陷性黄土在雨水下渗或地下水位上升时必然发生湿陷沉降,使桩板结构受力更加复杂。目前的研究主要针对地基桩板结构的动力特性与设计理论^[10-14],对复杂地质地区桩板结构的承载特性认识不足。为验证非埋式桩板结构路基是否满足高速铁路的高标准要求,结合现场长期观测试验数据,分析其工作机制和处理效果,以期高速铁路路基的设计提供科学依据。

表 1 物理力学指标

Tab. 1 Physico-mechanical parameters

层号	名称	重度/(kN·m ⁻³)	承载力/kPa	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)	桩侧单位摩阻力/kPa	湿陷系数	自重湿陷系数
1	松软土	14.7	120	10.1	26.4	—10	0.007~0.104	0.000~0.061
2	砂质黄土	15.1	140	15.3	26.9	—15	0.000~0.340	0.000~0.990
3	砂质黄土	15.1	220	14.3	28.0	60		

1.3 现场测点布置

为了测试非埋式桩板结构路基的沉降特性、板土接触应力与结构内力等,在路堑地段范围内设置测试点,元器件布置见图 2。在图 2 中: $B_1 \sim B_{10}$ 为承台板钢筋计测试点; $L_1 \sim L_8$ 为托梁钢筋计测试点; $C_1 \sim C_4$ 为沉降观测点; $T_1 \sim T_5$ 为土压力盒测试点。

2 理论计算方法

2.1 模型简化

按等刚度的原则,把空间的桩板结构分别按纵向或横向转化为平面结构,同时将结构自重恒载与

1 现场测试

1.1 工程概况

郑西客运专线沿线大部分地段通过黄土堆积地貌单元,属于黄河二级阶地,约占线路总长的 85%。沿线沟槽深切,冲沟发育,地下水埋深为 30 m,在深厚湿陷性黄土地基低路堤与路堑路段采用非埋式桩板结构。非埋式桩板结构由上部钢筋混凝土承台板、下部钢筋混凝土托梁和钻孔灌注桩组成,承台板上直接铺设无砟轨道,属于轨下基础结构。考虑到控制不均匀沉降的需要,选用等跨布置的标准联桩板结构,其纵断面见图 1。

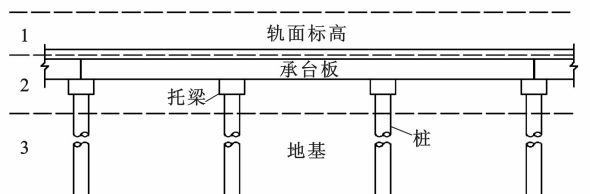


图 1 纵断面结构

Fig. 1 Vertical section structure

1.2 地基土物理力学参数

试验段为挖方路基,路堑中心最大挖深为 7 m,结构下部地基土体包括松软土与砂质黄土,其主要物理力学指标见表 1。

列车活载简化为均布荷载作用在平面杆件上。纵向计算模型见图 3,分别对承台板以及桩的受力与变形进行分析;横向计算模型见图 4,分别对托梁及桩的受力与变形进行分析。

2.2 换算桩长

考虑土体对桩的横向作用,在简化模型中引入综合转动刚度概念,同时不考虑地基反力对板的支承作用。综合转动刚度 ρ 为桩土相互作用下,桩顶抵抗转动变形的能力,其计算式为

$$\rho = \frac{1}{\varphi_0} = [\alpha E_1 I (a_3 b_4 - b_3 a_4) (b_3 d_4 - d_3 b_4)] / [(c_3 a_4 -$$

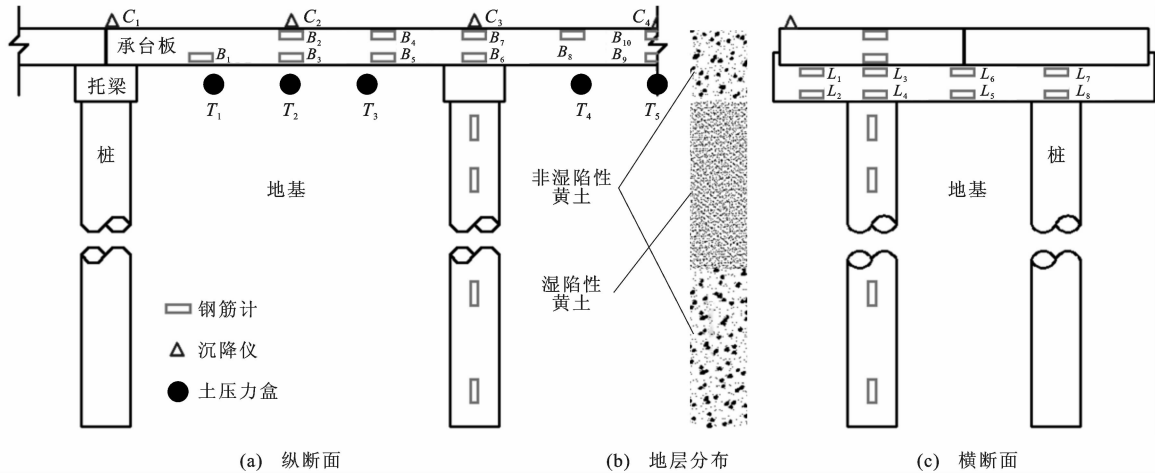


图 2 测点布置

Fig. 2 Arrangement of measuring points

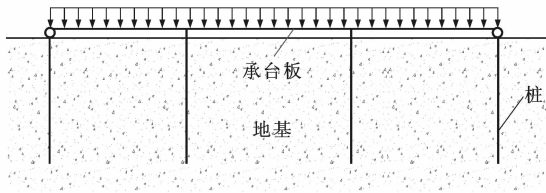


图 3 纵断面二维模型

Fig. 3 2D model of vertical section

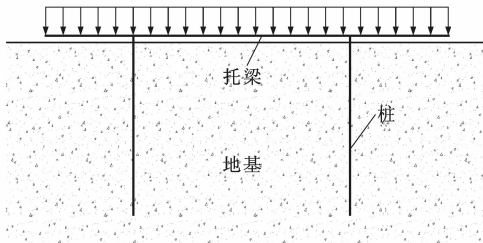


图 4 横断面二维模型

Fig. 4 2D model of cross section

$$a_3 c_4)(b_3 d_4 - d_3 b_4) + (c_4 b_3 - c_3 b_4)(d_3 a_4 - a_3 d_4)]$$

式中: φ_0 为桩顶转角; α 为桩的变形系数; E_1 为桩的弹性模量; I 为桩截面的惯性矩; a_3 、 a_4 、 b_3 、 b_4 、 c_3 、 c_4 、 d_3 、 d_4 均为待定常数。

为便于计算,采用换算桩长对桩板结构进行计算。换算桩长是将与土相互作用的实际桩长换算为与土无相互作用的桩底铰接或固结的假想桩长,可按实际桩土综合转动刚度与换算桩转动刚度等刚度的原则求得,其计算式为

$$h = 3E_1 I / \rho$$

通过换算桩长,计算模型可进一步简化为平面框架模型。可用力矩分配法与力法求解承台板和托梁的内力及变形,用 m 法求解桩的内力及变形。

3 测试结果分析

3.1 板土接触应力

相关计算表明:随着地基系数 K 值的增大,板土接触应力逐渐增大,相应的沉降则逐渐减小^[15];当 K 值小于 $200 \text{ N} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时,接触应力随 K 值的增大变化较大;当 K 值接近于桩基的纵向刚度时,各点接触应力趋近于上部荷载平均值。根据承台板与地基土体接触应力的测试值可反算地基系数,得到地基土对承台板的支撑作用。在桩板结构各跨的 $1/4$ 跨、跨中以及 $3/4$ 跨处,承台板与土体之间埋设土压力盒,测试的接触应力见图 5。

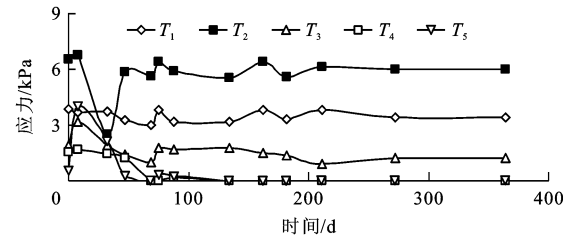


图 5 板土接触应力时程曲线

Fig. 5 Time-history curves of plank-soil contact stresses

承台板浇筑完成后,测试数据受混凝土水化热影响,前期变化剧烈,混凝土强度逐渐形成后,接触应力测试值趋于稳定。在后期轨道板施工及空置期间,土压力又多次出现“先增大-再减小-又增大”的变化规律,这是桩板结构与地基体系相互耦合调整造成的。由弹性地基理论可知,承台板与路基的接触应力与承台板的挠度成正比,板下土压力应为中间大、两边小的凹曲线。实测板下土压力分布为不规则的曲线,但数值较小,板土接触应力为 $2 \sim 5 \text{ kPa}$ 。桩基与桩间土的刚度差异较大,在长期使用

过程中两者之间产生沉降差,板下土体支撑逐渐弱化,上部荷载逐渐转移到桩顶,土体的支撑作用在设计中可将其视为安全储备。

3.2 承台板与托梁主筋应力分析

非埋式桩板结构路基承台板沿两对边支承于托梁上,属于典型的单向板。承台板与托梁刚接或铰接,托梁与桩基刚接。承台板承受轨道结构静荷载和列车动荷载,托梁将上部承台板传递来的荷载传递给下部钢筋混凝土桩基,两者结构尺寸既需要满足结构内力与变形控制的要求,又需要满足路基构造的要求。分别对承台板和托梁的主筋应力进行测试,分析其受力特性,见图 6、7。

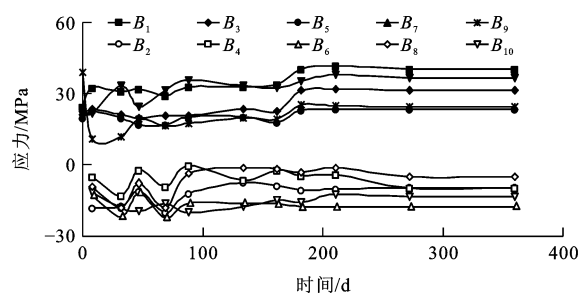


图 6 承台板主筋应力时程曲线

Fig. 6 Time-history curves of reinforcement stresses of plank

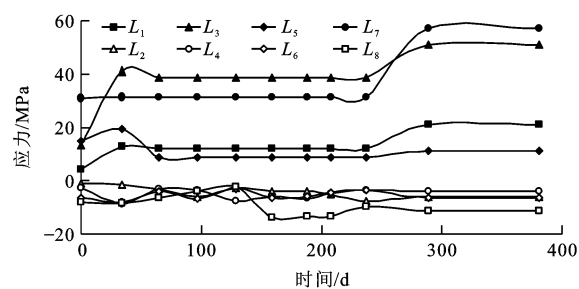


图 7 托梁主筋应力时程曲线

Fig. 7 Time-history curves of reinforcement stresses of joist

选择温度场稳定之后的钢筋计读数作为分析对象,承台板与托梁主筋应力整体呈增长趋势,并逐渐趋于稳定。在施工进度的推进过程中,承台板主筋应力出现了“先减小-再增大-又减小”的波动变化,再次说明桩板结构与地基之间存在一个调整过程,而且承台板受地基土体的影响远大于托梁。轨道结构施工结束半年后,承台板支座截面处主筋最大拉应力为 37.75 MPa,主筋最大压应力为 -18.00 MPa,承台板跨中截面主筋最大拉应力为 31.69 MPa,主筋最大压应力为 -10.87 MPa;托梁的支座截面处主筋拉应力平均为 60.60 MPa,主筋压应力平均为 -5.46 MPa,跨中截面主筋拉应力平均为 13.14 MPa,主筋压应力

平均为 -8.12 MPa。结构主筋应力远小于钢筋极限强度。

将各测试断面钢筋计受力均值按容许应力法换算得到承台板的实测弯矩。承台板上部荷载简化为均布荷载,桩板结构简化为平面杆系结构,桩间土对桩的侧向作用通过节点弹簧模拟,采用数值仿真计算得到承台板的理论弯矩。实测弯矩与理论弯矩沿跨度方向的分布规律见图 8。承台板实测弯矩与理论弯矩的对比表明承台板主筋应力分布规律与理论值吻合良好,换算弯矩值小于按自重荷载作用下的理论值,说明设计承载力是安全可靠的。理论上边跨支座处按铰接计算弯矩为零,但是托梁实际存在一定宽度,换算得边跨支座处有一定负弯矩,因此,针对承台板端部一般需要进行特殊设计。

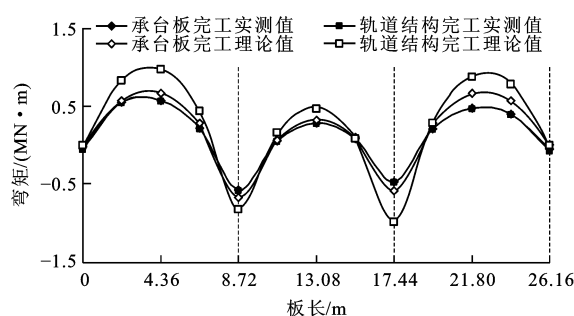


图 8 弯矩分布曲线

Fig. 8 Distribution curves of bending moments

3.3 桩基主筋应力

沿桩身不同位置布置钢筋计以测试桩体应力,其中 5# 桩的测试结果见图 9,换算其桩基轴力和摩阻力见图 10、11。

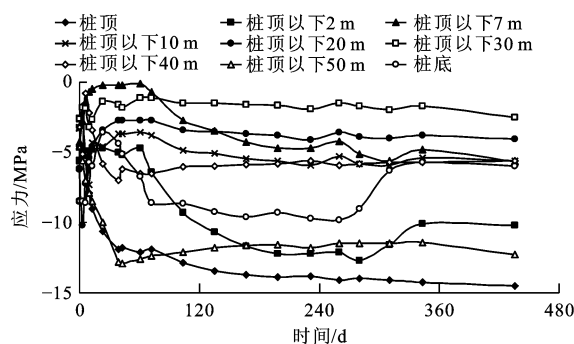


图 9 桩基主筋应力时程曲线

Fig. 9 Time-history curves of reinforcement stresses of pile

随着工序的推进,桩体主筋应力逐渐增大,沿深度方向桩体应力逐渐减小,约有 95% 的荷载由桩侧土承受。根据非埋式桩板结构的桩体轴力与桩基侧摩阻力的关系,反演桩基侧摩阻力,结果表明桩侧未出现负摩阻力,说明路基排水系统大大减少了雨水

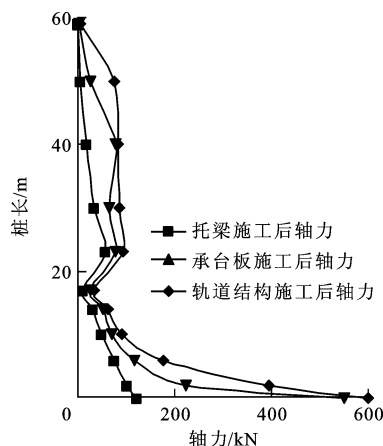


图 10 桩基轴力分布曲线

Fig. 10 Distribution curves of axial forces of pile

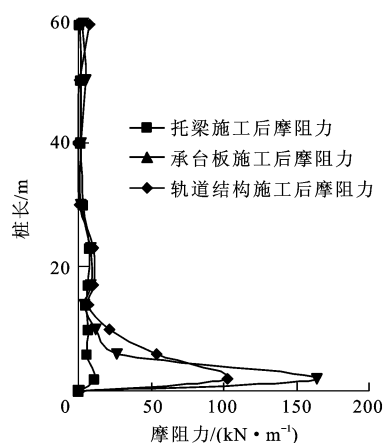


图 11 桩基摩阻力分布曲线

Fig. 11 Distribution curves of friction resistances of pile

的下渗量,同时地下水位埋深较大,且未发生大幅上升。桩基侧摩阻力沿深度方向逐渐增大,桩顶以下 4 m 处达到最大,然后逐渐减小,桩深 10 m 范围内摩阻力发挥作用较大,随着工序的推进,桩基侧摩阻力发挥程度逐渐增加。

3.4 桩板结构路基沉降

传统结构路基沉降的影响因素包括上部荷载的大小及分布、地基土的性质、地基处理方式等。桩板结构路基沉降主要包括桩基下沉引起的沉降变形和承台板由于混凝土收缩徐变产生挠度引起的竖向变形。桩板结构路基的沉降变形见图 12。桩板结构路基整体沉降均匀,轨道结构施工结束时,平均累计沉降为 0.8 mm。轨道结构施工结束半年后,测点最大累计沉降为 1.0 mm,位于中跨跨中断面;最小累计沉降为 0.8 mm,位于边跨支座断面;最大差异沉降为 0.2 mm。承台板中跨沉降略大于边跨沉降。

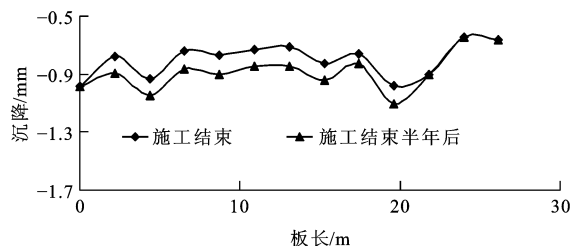


图 12 总沉降分布曲线

Fig. 12 Distribution curves of total settlements

4 结 语

(1) 桩板结构路基是一种新型刚性轨下基础结构,其荷载传递规律与传统路基不同,承台板承受轨道结构静荷载和列车动荷载作用,然后传递给托梁,托梁再将上部承台板传递来的荷载传递给桩基,桩基将荷载传递到持力层,改善了路基软弱土体部分的受力状态。

(2) 结构测试值换算弯矩与理论值吻合较好,相差 10%~30%;轨道结构施工结束半年后,承台板主筋最大应力出现在支座截面处,为 37.75 MPa;托梁主筋最大应力出现在支座截面处,为 60.60 MPa;桩基主筋最大应力出现在桩顶,为 14.56 MPa;上部轨道荷载作用下,路基桩板结构各部件均处于弹性工作状态,说明采用弹性理论建立理论计算模型是合理的。

(3) 承台板与路基接触应力和承台板变形受板下地基土刚度的影响较明显,接触应力测试值较小,土压力为 2~5 kPa,设计计算时可作为安全储备。

(4) 根据桩基主筋应力反演,截至铺轨结束半年后桩侧未出现负摩阻力,摩阻力主要发生在桩顶下 10 m 范围内。

(5) 在深厚湿陷性黄土地基上应用非埋式桩板结构路基,轨道结构施工完半年后,测点最大累计沉降为 1.0 mm,成功实现了客运专线无砟轨道路基沉降的有效控制。

参 考 文 献 :

References :

- [1] FRUHAUF W, SCHOLZ M, STOIBERER H. 困难地基路段的无砟轨道工程[J]. 铁路技术评论, 2005, 11(1): 61-66.
FRUHAUF W, SCHOLZ M, STOIBERER H. The construction of ballastless track in the difficult foundation section[J]. Railway Technology Review, 2005, 11(1): 61-66. (in Chinese)
- [2] 王小军, 屈耀辉, 魏永梁, 等. 郑西客运专线湿陷性黄土区试验路堤的沉降观测与预测研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(增 1):

- 220-231.
- WANG Xiao-jun, QU Yao-hui, WEI Yong-liang, et al. Settlement observation and prediction research of test embankment in collapsible loess area along Zhengzhou-Xi'an Passenger Dedicated Line[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S1): 220-231. (in Chinese)
- [3] SU Qian, BAI Hao, WANG Xun, et al. In-situ test on fatigue characteristics of top-mounted dividable pile-board subgrade for high-speed railway[J]. Journal of Southwest Jiaotong University: English Edition, 2010, 18(1): 8-12.
- [4] 苏 谦, 李安洪, 丁兆锋, 等. 郑西客运专线深厚湿陷性黄土地基桩板结构设计分析[J]. 铁道建筑技术, 2007(2): 1-4.
- SU Qian, LI An-hong, DING Zhao-feng, et al. Design and analysis on pile-board structure of deep collapsible loess ground along Zhengzhou-Xi'an Passenger Dedicated Line[J]. Railway Construction Technology, 2007(2): 1-4. (in Chinese)
- [5] SU Qian, LI Xing, BAI Hao. Dynamic response of pile-board subgrade based on large scale model test[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 71-78: 383-387.
- [6] 魏永幸. 客运专线无砟轨道桩-板结构路基[J]. 铁道工程学报, 2008(4): 19-22.
- WEI Yong-xing. Study on pile-slab structure subgrade for ballastless track of passenger dedicated line[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008(4): 19-22. (in Chinese)
- [7] 詹永祥, 蒋关鲁. 桩板结构路基桩-土工作特性[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(4): 38-42.
- ZHAN Yong-xiang, JIANG Guan-lu. Pile-soil interaction properties of pile-plank embankment[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(4): 38-42. (in Chinese)
- [8] 詹永祥, 蒋关鲁, 胡安华, 等. 遂渝线无砟轨道桩板结构路基动力响应现场试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 832-835.
- ZHAN Yong-xiang, JIANG Guan-lu, HU An-hua, et al. Study of dynamic response of pile-plank embankment of ballastless track based on field test in Suining-Chongqing High-speed Railway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(3): 832-835. (in Chinese)
- [9] 詹永祥, 蒋关鲁, 魏永幸. 无砟轨道桩板结构路基在地震荷载下的动力响应分析[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(6): 22-26.
- ZHAN Yong-xiang, JIANG Guan-lu, WEI Yong-xing. Dynamic response analysis on the pile-plank structure roadbed of ballastless track under earthquake load[J]. China Railway Science, 2006, 27(6): 22-26. (in Chinese)
- [10] 詹永祥, 蒋关鲁, 牛国辉, 等. 高速铁路无砟轨道桩板结构路基模型试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2007, 42(4): 400-403, 408.
- ZHAN Yong-xiang, JIANG Guan-lu, NIU Guo-hui, et al. Model test investigation of pile-plank embankment of ballastless track for high-speed railway[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2007, 42(4): 400-403, 408. (in Chinese)
- [11] 丁兆锋. 路基桩板结构平面简化法则及解析计算[J]. 铁道工程学报, 2011(8): 42-46.
- DING Zhao-feng. Plane simplified rules and analytical calculation for pile-board structure of subgrade[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011(8): 42-46. (in Chinese)
- [12] 李保俊, 马坤全, 张欣欣. 高速铁路无砟轨道桩板结构路基动力特性研究[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2011, 24(1): 63-68.
- LI Bao-jun, MA Kun-quan, ZHANG Xin-xin. Study on dynamic property of pile-plank embankment used in high-speed railway with slab-track[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University: Natural Science, 2011, 24(1): 63-68. (in Chinese)
- [13] 罗照新, 丁兆锋. 客运专线桩板结构设计方法的探讨[J]. 铁道工程学报, 2008(8): 33-36.
- LUO Zhao-xin, DING Zhao-feng. Discussion on the design method of pile-slab structure for passenger dedicated railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008(8): 33-36. (in Chinese)
- [14] 杨正国, 罗照新. 顶置分幅式路基桩板结构的应用与技术经济分析[J]. 高速铁路技术, 2010, 1(4): 8-10, 25.
- YANG Zheng-guo, LUO Zhao-xin. Application and technical-economic analysis of top divided pile-board structure embankment[J]. High Speed Railway Technology, 2010, 1(4): 8-10, 25. (in Chinese)
- [15] 姚洪锡. 武广客运专线软土地基桩板结构设计与应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- YAO Hong-xi. Study on the design and application of pile-board structure to soft soil ground for Wuhan-Guangzhou Passenger Dedicated Line[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009. (in Chinese)