

城市轨道交通地下线预制板式轨道研究及应用

郑 强

(中铁上海设计院集团有限公司, 200070, 上海//高级工程师)

**摘 要** 目前城市轨道交通一般采用现浇无砟轨道,存在效率低且施工精度难以保证等问题。而高铁 CRTSⅢ型板式无砟轨道施工精度高、效率高且技术成熟,因此国内首次将高铁技术引入城市轨道交通,在高铁 CRTSⅢ型板的基础上研发了适用于城市轨道交通的预制板式轨道,以提高城市轨道交通铺设质量。为此,从城市轨道交通预制板式轨道结构设计、理论计算、室内试验、轨道板制造工艺及施工工艺等方面进行了系统、全面研究,研究成果已广泛应用于上海轨道交通,可供同类型工程参考。

**关键词** 铁道工程; 板式轨道; 城市轨道交通; 预制

**中图分类号** U213.2<sup>+</sup>42

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2021.05.007

Research and Application of Precast Slab Track in Urban Rail Transit Underground Line  
ZHENG Qiang

**Abstract** Currently, urban rail transit generally adopts cast-in-situ ballastless track, which has problems of low accuracy in construction, low efficiency. While high-speed railway CRTSⅢ slab ballastless track has high precision in construction, high efficiency and mature technology. Therefore high-speed railway technology is introduced into urban rail transit domestically for the first time. On the basis of high-speed railway CRTSⅢ slab, precast slab track applicable to urban rail transit is developed, to improve the quality of urban rail transit laying. Systematic and comprehensive research is conducted in urban rail transit precast slab track structure design, theoretical calculation, indoor test, manufacturing and construction technology of track slab. The research results have been widely applied in Shanghai rail transit and can be used as reference for similar projects.

**Key words** railway engineering; slab track; urban rail transit; precast

**Author's address** China Railway Shanghai Design Institute Group Co., Ltd., 200070, Shanghai, China

城市轨道交通无减振要求地段一般采用现浇无砟道床。自 20 世纪 90 年代以来,随着国内轨道

交通的迅猛发展,城市轨道交通无砟道床的施工工艺已形成较为完备的施工作业体系。由于施工配套方案仍基于 90 年代的轨道铺设工艺及精度要求,且受到轨道交通隧道内、高架桥等施工作业空间的限制,因此存在铺轨测设精度不高、以小型机械为主、大量依靠人力施工、施工精度较难保证、运营后养护维修量较大等不足。目前,高铁轨道的新技术已应用在板式轨道的设计和施工上,主要体现在精密测量、制作质量、先进的成套设备、轨道精调等方面,其无砟轨道结构形式主要包括了 CRTSⅠ、CRTSⅡ、CRTSⅢ三类。其中,CRTSⅠ、CRTSⅡ板采用 CA 砂浆层进行调整,施工要求较高,且耐久性不足;CRTSⅢ板采用自密实混凝土,便于施工,且环境适应性及耐久性较好。本项目在高铁 CRTSⅢ型板的基础上研发适用于城市轨道交通的预制板式轨道,以提高城市轨道交通的铺设质量<sup>[1-3]</sup>。

1 结构设计

城市轨道交通预制板式轨道结构由钢轨、扣件、预制轨道板、自密实混凝土调整层、限位结构(门型筋+凹槽)、中间隔离层和钢筋混凝土基底组成。轨道板采用单元分块式结构,为无挡肩钢筋混凝土结构,混凝土强度等级为 C50,非预应力结构。根据限界及轨道板的特点,本文针对表 1 中的尺寸进行研究。

表 1 轨道板尺寸比选方案			m
轨道板长度/m		轨道板 宽度/m	轨道板 厚度/m
扣件间距 600 mm	扣件间距 625 mm		
3.5	3.625	2.2	0.18
4.7	4.875	2.3	0.19
5.9	6.125	2.4	0.20

通过如图 1 所示的静力学分析得出结论:轨道板长度较大,扣件间距较小时受力情况较好;宽度增加时应力及弯矩均变小;随着厚度的增加,轨道

板所受应力减小,弯矩增大。通过限界分析,轨道板宽度取 2.3 m 时满足限界要求,取 2.4 m 时轨道板可能碰到隧道壁,处于临界值,如图 2 所示。

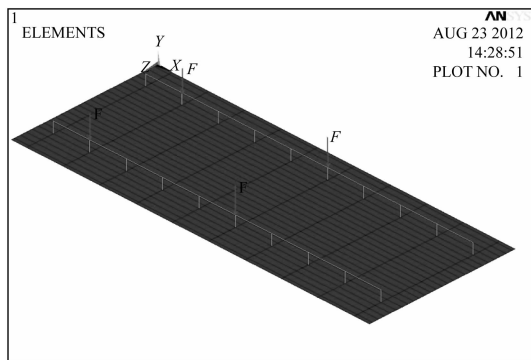


图 1 单块轨道板受力图

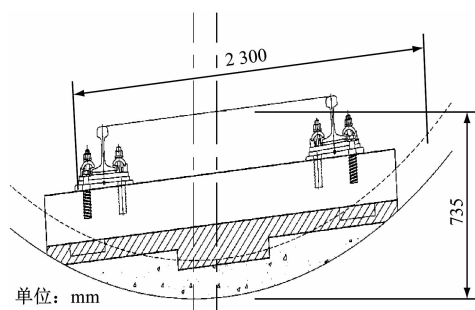


图 2 限界分析

考虑曲线地段矢距变化的影响,采用半矢距方法(见图 3)进行轨道板定位,按其第二组扣件和倒数第二组扣件中心线与线路中心线重合布置。选择长度 3.5、4.7、5.9 m 轨道板进行计算,其中,5.9 m 轨道板扣件矢距变化量较大,需要设计两种曲线板,3.5 m 和 4.7 m 只需要设计一种曲线板。

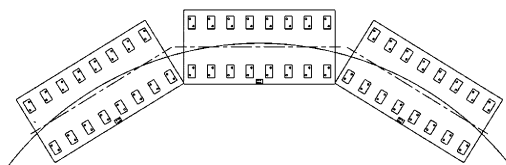


图 3 曲线地段矢距变化分析(采用半矢距法)

综上,选择标准轨道板长度为 4 700 mm,宽度为 2 300 mm,厚度为 200 mm。轨道板与基底间设置自密实混凝土,即自密实混凝土结构调整层强度等级为 C35,厚度为 80 mm,采用单层钢筋网配筋设置。其结构设计如图 4 所示:自密实混凝土与基底间设置中间隔离层,采用 4 mm 聚丙烯无纺土工布;基底为 C35 混凝土结构;轨道板下设门型筋,基底

采用双凹槽方案,凹槽长宽深尺寸为 700 mm × 400 mm × 80 mm<sup>[4]</sup>。

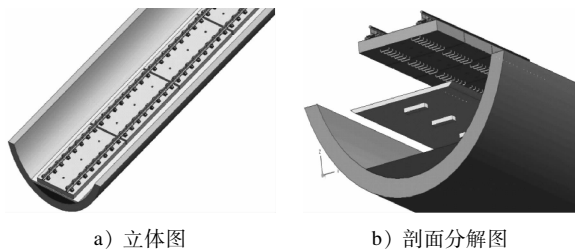


图 4 城市轨道交通预制板式轨道结构设计图

## 2 计算分析研究

### 2.1 静力仿真计算

#### 2.1.1 计算参数

采用地铁 A 型车参数,相邻两车两个转向架位于相邻两块轨道板时的最不利工况;车辆转向架轴距为 2.5 m,转向架中心距为 15.7 m,相邻两车转向架轴距为 3.9 m;当速度  $v = 120$  km/h 时,单个动轮载  $F = 14$  t;ANSYS 有限元模型的轨道长度  $L = 50$  m,钢轨两端自由<sup>[5]</sup>。

建立梁-板-体模型,钢轨采用弹性点支撑无限长 Euler 梁,扣件采用线性点支撑弹簧单元,轨道板采用板壳单元,自密实混凝土采用线性弹簧单元,基底采用三维实体模型。其中,扣件刚度  $K = 4 \times 10^7$  N/m,轨道板及基底弹性模量  $E = 34.5$  GPa,泊松比为 0.2,密度为  $2\,500$  kg/m<sup>3</sup>,自密实混凝土刚度  $K = 15.6 \times 10^7$  N/m,基底全约束。

#### 2.1.2 计算结果

位移:在轨道板自重、车辆荷载作用下,钢轨最大位移为 1.466 mm,轨道板最大位移为 0.020 mm。

应力:钢轨承受最大应力为 218 MPa,轨道板承受最大应力为 0.87 MPa。

弯矩:沿线路纵向轨道板最大弯矩为 9.194 (kN · m)/m,沿线路横向轨道板最大弯矩为 5.936 (kN · m)/m。

由计算结果可知,钢轨位移、轨道板受力均在合理范围内(见图 5)。

### 2.2 轨道板强度检算

轨道板按 C50 混凝土参数计算,轨道板纵向上下层各配 16 根直径为 14 mm 的 HRB400 钢筋,横向上下层各配 32 根直径为 14 mm 的 HRB400 钢筋。

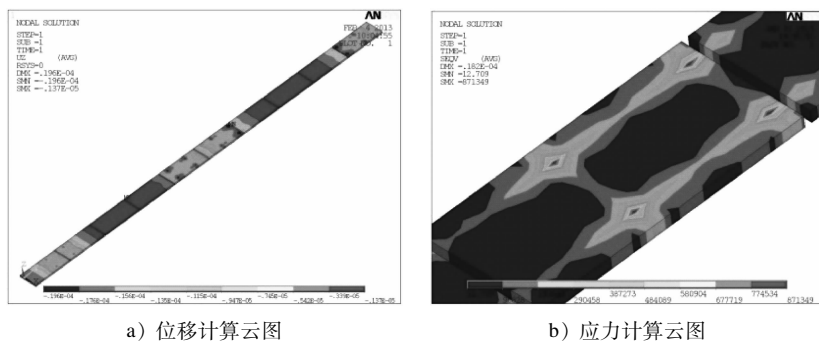


图5 静力仿真分析位移、应力、弯矩结果

1) 轨道板纵向强度检算。

$$M = \frac{f_y A_s (h_0 - a'_s)}{L} =$$

$$45.757 \text{ (kN} \cdot \text{m)/m} > 9.194 \text{ (kN} \cdot \text{m)/m}$$

式中各符号含义参见文献[6]。

2) 轨道板横向强度检算。

$$M = \frac{f_y A_s (h_0 - a'_s)}{L} =$$

$$37.712 \text{ (kN} \cdot \text{m)/m} > 5.936 \text{ (kN} \cdot \text{m)/m}$$

3) 轨道板纵向裂缝检算。

$$\omega_{\max} = \alpha_{cr} \Psi \frac{\sigma_s}{E_s} \left( 1.9c_s + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \right) =$$

$$0.051 \text{ mm} < 0.200 \text{ mm}$$

式中各符号含义见文献[6]。

4) 轨道板横向裂缝检算。

$$\omega_{\max} = \alpha_{cr} \Psi \frac{\sigma_s}{E_s} \left( 1.9c_s + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \right) =$$

$$0.069 \text{ mm} < 0.200 \text{ mm}$$

经检算,轨道板强度及裂缝均符合要求。

此外,进行了小半径曲线地段温度荷载作用下的强度检算,分多种工况进行有限元分析。第一种工况,轨道板体系自重+列车动荷载;第二种工况,施加温度荷载,铺轨温度 20℃,环境温度升温至 40℃,即轨道板体系自重+整体升温 20℃;第三种工况,组合第一、第二种工况,即轨道板体系自重+列车动荷载+整体升温 20℃,如图 6 所示。

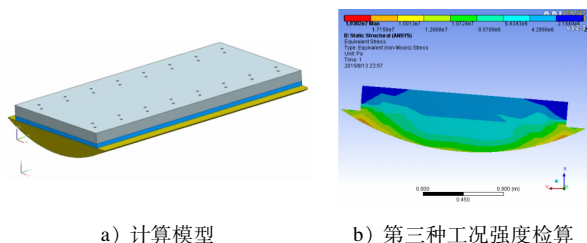


图6 小半径曲线地段温度荷载作用下的强度检算

在第三种工况下,轨道板上表面板端中部变形最大为 0.25 mm,自密实混凝土表面变形为 0.12 ~ 0.17 mm,下层变形为 0.020 ~ 0.095 mm,凸台变形为 0.095 mm,变形均较单纯升温工况小。轨道板最大等效应力在套管处约为 14.000 MPa,板中为 6.430 MPa,板端为 2.144 MPa;自密实混凝土上表面应力为 4.28 ~ 8.57 MPa,自密实混凝土下表面应力为 4.28 ~ 15.00 MPa,凸台局部最大为 12.8 MPa,基底为 4.28 ~ 15.00 MPa,弹性垫板为 2.15 MPa。综上,考虑隧道内温差不会超过 20℃,本次轨道板体系应用于地下小半径曲线地段时,强度满足安全性要求。

## 2.3 基底凹槽强度检算

自密实混凝土与基底按 C35 混凝土参数计算,基底混凝土凹槽周围采用厚度为 8 mm、弹性模量为 6 MPa 的橡胶材料,凹槽受到的温度力  $F_t$  由以下方程解出:

$$\frac{(E_c \alpha_c \Delta T B h - F_t) \Delta L}{E_c B h} = \frac{t F_t}{E_x A_x}$$

式中:

$E_c$ ——混凝土弹性模量;

$\alpha_c$ ——混凝土线膨胀系数;

$\Delta T$ ——轨道板与基底的温差;

$B$ ——轨道板宽度;

$h$ ——轨道板及自密实混凝土厚度;

$t$ ——凹槽周围橡胶材料厚度;

$E_x$ ——凹槽周围橡胶弹性模量;

$A_x$ ——凹槽周围橡胶材料面积;

$\Delta L$ ——两凹槽间距离<sup>[7]</sup>。

经计算,温度力  $F_t$  为

$$F_t = 20.027 \text{ kN}$$

纵向力  $F_z$  为

$$F_z = n f$$

式中:

$N$ ——单块板扣件个数;

$f$ ——单个扣件纵向阻力。

凹槽混凝土纵向应力  $\sigma_z$  为

$$\sigma_z = \frac{F_z + F_t}{A_x} = 3.5 \text{ MPa} < 16.7 \text{ MPa}$$

由计算结果可知,双凹槽结构+橡胶垫层满足混凝土受力及结构构造要求。

## 2.4 计算结论

本文对预制轨道板的关键技术进行了计算分析,得出以下结论:① 在上海 A 型车辆荷载作用下,钢轨最大位移为 1.466 mm,预制轨道板最大位移为 0.020 mm,钢轨承受最大应力为 218 MPa,轨道板承受最大应力为 0.87 MPa,沿线路纵向轨道板最大弯矩为 9.194 (kN·m)/m,沿线路横向轨道板最大弯矩为 5.936 (kN·m)/m,各项指标均在合理范围内。② 预制轨道板的纵向裂缝为 0.051 mm,横向裂缝为 0.069 mm,裂缝检算合格。③ 预制轨道板的双凹槽结构+橡胶垫层可满足混凝土受力及结构构造要求。

## 3 室内试验

### 3.1 静载试验及螺栓抗拔力试验

对轨道板进行了双轴静载试验和单轴静载试验,分析轨道板应力强度和轨道板垂向位移。

#### 3.1.1 双轴静载试验

加载方式:试验前,板底预先灌注自密实混凝土,当形成设计需要的复合板结构试验时,用砂浆把轨道板和试验平台找平。

荷载分级:320 kN,480 kN,640 kN,800 kN,960 kN。

测点布置:在板长的 1/2 位置(板中)和两端顶面贴纵向应变片(共 6 点),在板两侧尽量靠近板底线处贴纵向应变片(共 6 点),在板两侧 1/2 高度处贴压应变片(共 6 点),共 18 个应变测点,如图 7 所示。

试验结果如下:① 各级荷载作用下,混凝土压应力最大值为 0.24 MPa,出现在 960 kN 荷载作用下的 2' 测点处,远小于混凝土极限抗压强度 33.5 MPa。② 轨道板垂向位移随着荷载的增大而增大,当荷载加载至 960 kN 时,垂向最大位移为 0.2 mm 左右。不同荷载级差,位移级差的值也不相同,也即荷载和位移曲线并非线性关系。

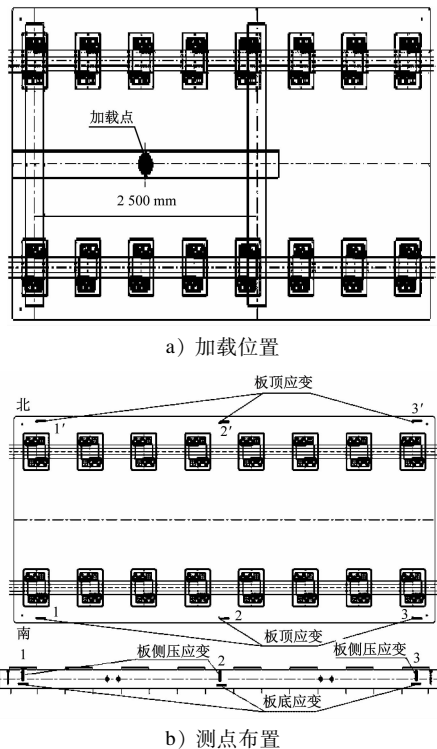


图 7 双轴静载试验加载位置及测点布置

#### 3.1.2 单轴静载试验

加载方式:加载点与双轴静载试验不同,其余相同。荷载分级和测点布置同双轴试验,如图 8 和图 9 所示。

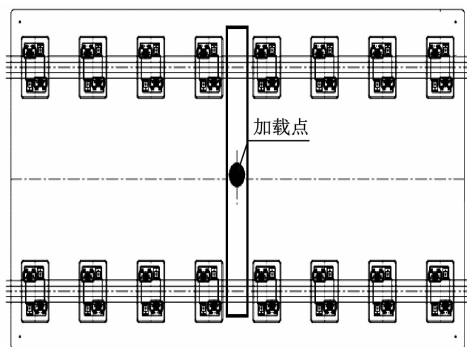


图 8 单轴静载试验加载位置

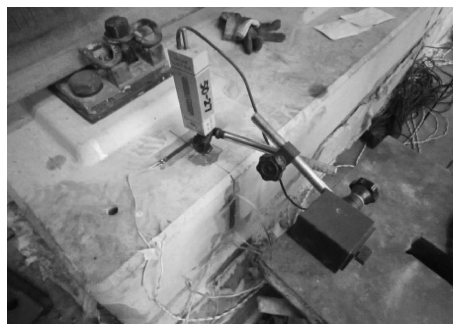


图 9 单轴静载试验测试照片

试验结果如下:① 各级荷载作用下,混凝土压应力最大值为 0.59 MPa,出现在 480 kN 荷载作用下的 2 测点处,远小于混凝土极限抗压强度 33.5 MPa,故仅对混凝土拉应力进行分析。混凝土应力基本都随荷载的增大而增大。在各级荷载作用下,混凝土纵向拉应力均小于极限抗拉强度 (3.1 MPa),都处于较低的应力水平。② 轨道板垂向位移随着荷载的增大而增大,当荷载加载至 960 kN 时,垂向最大位移为 0.2 mm 左右。不同荷载级差,位移级差的值也不相同,也即荷载和位移曲线并非线性关系。

### 3.1.3 板面裂纹状态观察

双轴静载试验和单轴静载试验,在整个加载试验过程中,轨道板均未出现裂纹。

### 3.1.4 螺栓抗拔力试验

本次试验随机测试 3 个螺栓套管 (见图 10),施加荷载至 60 kN 时,套管周围混凝土表面未见裂纹及剥离现象;继续施加荷载至 70 kN 时,混凝土表面仍未出现裂纹和剥离现象。



图 10 螺栓抗拔力测试照片

## 3.2 疲劳试验

加载方式:室内模拟单轴加载工况,在最不利情况下 (板中截面受力 20 ~ 160 kN) 进行 300 万次疲劳试验,检验轨道板是否开裂以及测试轨道板位移,如图 11 所示。

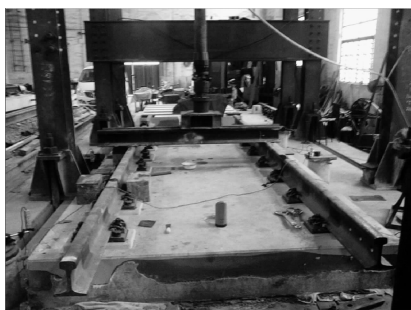


图 11 疲劳试验现场照片

试验结果如下:① 轨道板垂向位移最大值为 0.15 mm,认为是由于板底不平和基底铺设土工布所产生的特殊值。② 随着加载次数的增加,不同测点的变化趋势不尽相同,但变化幅度均较小。③ 疲劳荷载 20 ~ 160 kN,经过 300 万次作用,轨道板上无裂纹出现。

## 4 制造工艺

轨道板主要制造工艺:钢筋骨架制作,按照设计图纸尺寸制作钢筋绑扎模具,确保钢筋笼的组装精度;模型清理、合模,喷隔离剂;安装预埋套管,起吊套管、螺旋筋,观察孔埋件;骨架入模,用专用软索吊具将绑扎好的钢筋骨架吊入模型;混凝土灌注、振动,混凝土静停;轨道板的蒸汽养护,轨道板脱模,轨道板养护,轨道板外观质量检测<sup>[8]</sup>。

## 5 施工工艺

### 5.1 主要施工工艺流程

轨道板为专项设计的标准定型产品,采用工厂化预制,加工成型的成品轨道板通过汽车运输至铺轨基地并存储;在铺轨基地内采用桁车将预制轨道板吊装至轨道平板车上,轨道车运输至施工作业面,隧道内施工作业面采用轨道式铺轨门吊进行轨道板吊运、铺设及初步就位作业;采用轨道基础控制网、配套测量系统及工装设备进行轨道板几何位置调整;固定轨道板位置,在铺轨基地设置小型自密实混凝土拌合站,采用轮轨式搅拌车运输自密实混凝土作业面,进行自密实混凝土层灌注施工,安装线路钢轨扣件等作业,预制板基底混凝土施工 (即隧道仰拱回填) 提前于轨道板铺设前完成<sup>[9]</sup>。

### 5.2 主要分项工序

#### 5.2.1 板式轨道基底施工 (隧道仰拱回填)

板式轨道基底施工测量,基底清理,板式轨道基底钢筋绑扎,基底结构缝模板安装,基底限位凹槽模板的安装,基底混凝土施工,基底整修及清理。

#### 5.2.2 轨道板铺设前的施工

轨道板位置的测量放线,曲线地段轨道板的布板方案,土工布隔离层的铺设,弹性垫层的粘贴施工,铺设钢筋网片。

#### 5.2.3 轨道板存储、运输及铺设

轨道板的铺轨基地存储,轨道板的运输,轨道板的铺设及初步就位<sup>[10]</sup>。

### 5.2.4 轨道板的精调及固定

全站仪设站定向,轨道板调节器的安装及精调,测量位移百分表的安装,封边模板与扣压支架(反力架)的安装,防上浮支架(反力架)的设计及计算。

### 5.2.5 自密实混凝土灌注

自密实混凝土灌注准备及检查,自密实混凝土拌制及运输,自密实混凝土灌注工装设备的拆除及自密实混凝土养护。随着预制轨道板的应用推广,推动了配套施工装备的逐步更新,出现了轮胎式铺板机等新型设备。

## 6 结语

本文系统、全面地介绍了上海轨道交通预制轨道板的总体设计方案、主要计算指标、室内试验、轨道板制造工艺及施工工艺,得出以下结论:①在地铁 A 型车辆荷载作用下,预制轨道板系统的钢轨位移、轨道板位移和应力各项指标均在合理范围内。②预制轨道板双凹槽+橡胶垫层结构满足混凝土受力及结构构造要求,轨道板裂缝检算合格。③预制轨道板双轴静载试验、单轴静载试验、螺栓抗拔力试验及疲劳试验结论显示,轨道板位移和应力各项指标均在合理范围内。④预制轨道板的制造工艺、施工工艺成熟可靠。⑤预制轨道板的应用将显

著提高轨道施工质量,改善施工条件,给城市轨道交通带来巨大的促进作用。通过铺设高精度轨道,可减小轨道的养护维修工作量和延长轨道的使用寿命,具有较为明显的社会效益和经济效益。

## 参考文献

- [1] 李中华. CRTS I 型与 CRTS II 型板式无砟轨道结构特点分析[J]. 华东交通大学学报, 2010(1): 22.
- [2] 王成晓. CRTS III 型板式无砟轨道力学特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [3] 李俊玺. 上海市轨道交通 12 号线轨道新技术的设计与应用[J]. 铁道标准设计, 2017(4): 5.
- [4] 尤瑞林, 范佳, 王继军, 等. 高速铁路无砟道岔用道岔板设计研究[J]. 铁道建筑, 2011(7): 131.
- [5] 国家铁路局. 铁路轨道设计规范: TB 10082—2005[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [7] 孙立. 客运专线桥上双块式无砟轨道抗剪凸台设计计算研究[J]. 铁道建筑技术, 2009(8): 1.
- [8] 李保友, 姜恒昌, 张光明, 等. CRTS III 型普通钢筋混凝土轨道板预制浇筑水化热分析[J]. 高速铁路技术, 2019(6): 35.
- [9] 曹德志. 板式轨道在地铁中的应用研究[J]. 都市快轨交通, 2018(1): 109.
- [10] 尹金铭. 城市轨道交通工程预制板式道床施工技术[J]. 上海建设科技, 2016(4): 27.

(收稿日期: 2020-10-01)

(上接第 30 页)

- [2] LI B, JI F. Analysis of the influence of shield construction on the surrounding ground surface settlement [C] // International Conference on Engineering Management. Advances in Economics, Business and Management Research. 2016: 80.
- [3] 郑熹光, 何平, 张安琪, 等. 地铁施工对邻近桥梁桩基础内力影响分析[J]. 现代隧道技术, 2015(3): 110.
- [4] 张恒, 陈寿根, 邓稀肥. 盾构法施工对地表及桥梁桩基的影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011(3): 552.
- [5] LOGANATHAN N, POULOS H G. Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(9): 846.
- [6] 彭坤, 陶连金, 高玉春, 等. 盾构隧道下穿桥梁引起桩基变位的数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2012(3): 485.
- [7] 马文辉, 彭华, 杨成永. 盾构近距下穿既有地铁盾构隧道施工参数控制[J]. 西南交通大学学报, 2018(1): 119.

- [8] 李军, 雷明锋, 林大涌. 城市地铁盾构隧道下穿运营铁路施工控制技术研究[J]. 现代隧道技术, 2018(2): 174.
- [9] 王乐明. 高铁大直径盾构隧道下穿快轨路基结构的影响分析及控制技术研究[J]. 铁道标准设计, 2018(9): 109.
- [10] 周松, 荣建, 陈立生, 等. 大直径泥水盾构下穿机场的施工控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2012(4): 806.
- [11] 徐泽民, 韩庆华, 郑刚, 等. 地铁隧道下穿历史风貌建筑影响的实测与分析[J]. 岩土工程学报, 2013(2): 364.
- [12] 王闯, 彭祖昭, 荷超, 等. 盾构近接下穿群桩基础施工影响分区研究[J]. 土木工程学报, 2017(增刊2): 174.
- [13] 徐前卫, 朱合华, 马险峰, 等. 地铁盾构隧道穿越桥梁下方群桩基础的托换与除桩技术研究[J]. 岩土工程学报, 2012(7): 1217.
- [14] 谢耀耀, 王强, 刘欢, 等. 富水圆砾地层盾构下穿火车站股道沉降控制技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016(A02): 3960.

(收稿日期: 2019-05-31)