

# 复杂环境下上跨高速公路地铁高架桥施工关键技术

刘琳<sup>1</sup> 黄峰<sup>2</sup> 刘勇<sup>3</sup>

(1. 江苏联合职业技术学院南京工程分院, 211135, 南京; 2. 中建八局第三建设有限公司, 210046, 南京;  
3. 南京市市政工程质量安全监督站, 210036, 南京//第一作者, 副教授)

**摘要** 南京地铁 S9 号线一节点控制性连续梁桥处在软弱地基和中风化凝灰岩两种极端差异地质条件下, 上跨 S243 省道、下穿 220kV 高压线, 且施工期处于冬季低温季节, 施工环境极为复杂。针对该悬臂浇筑连续梁施工过程中存在的难点, 通过技术研究, 开发出一套关键施工技术, 包括新型的 0<sup>#</sup> 块支架体系以及挂篮防护蒸养一体化系统, 搭配以空间需求较小的三角挂篮及平头塔吊, 顺利解决了在复杂地质条件以及狭小作业空间情况下, 挂篮跨路安全防护以及冬季蒸养等施工难题。

**关键词** 地铁高架桥; 上跨高速公路; 挂篮施工; 新型 0<sup>#</sup> 块支架体系; 挂篮防护蒸养一体化系统

**中图分类号** U215

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.09.026

## Key Construction Technology of Metro Viaduct Crossing over Expressway in Complex Environment

LIU Lin, HUANG Feng, LIU Yong

**Abstract** A node controlled continuous beam bridge of Nanjing Metro Line S9 is located in two extremely different geological conditions: weak foundation and moderately weathered tuff. It spans across S243 provincial highway and under-passes 220 kV high-voltage line, and construction period is during low temperature season of winter. The construction environment is extremely complex. In view of the difficulties existing in the construction process of cantilever casting continuous beam of the bridge, a set of key construction technologies has been developed through technical research, including a new type of 0<sup>#</sup> block support system and the integrated system of basket protection and steam curing, coming with triangle hanging basket and flat head tower crane with small space demand. The problems of safety protection of hanging basket crossing road and steam curing in winter construction under complex geological conditions and narrow working space are solved successfully.

**Key words** metro viaduct; cross over expressway; hanging basket construction; new type of 0<sup>#</sup> block bracket system; integrated system of hanging basket protection and steam curing

**First-author's address** Jiangsu Union Vocational and Technical College Nanjing Engineering Division, 211135, Nanjing, China

高架桥梁是地铁线路穿越既有道路、建(构)筑物、河道的一种重要形式, 其梁体多采用预制或现浇预应力混凝土箱梁。近年来, 围绕着如何做好地铁高架桥梁施工, 许多工程技术人员开展了系列卓有成效的实践探索<sup>[1-5]</sup>, 但有关如何有效解决复杂地质、狭小空间条件下悬浇梁施工, 以及如何同时做好挂篮跨路安全防护和悬浇块混凝土冬季蒸养等问题的实践研究却并不多见。本文结合南京地铁 S9 号线一连续梁桥施工, 介绍了复杂环境下上跨高速公路地铁高架桥的关键施工技术。

## 1 工程概况

南京地铁 S9 号线施工里程 YDK8+342~YDK8+522 有一等宽变截面连续梁桥上跨 S243 省道, 设计墩号 B33—B36 (见图 1)。该连续梁桥总长 180 m, 跨径布置为 50 m+80 m+50 m, 宽度为 8.9 m。梁体横截面为单箱单室直腹板, 边跨直线段及中跨跨中截面梁高为 2.8 m, 中支点截面梁高为 5.0 m。

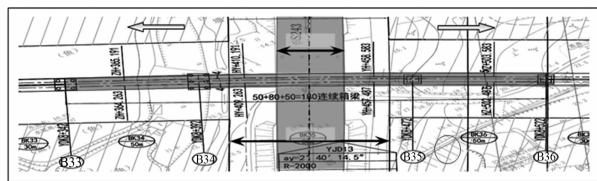


图1 南京地铁 S9 号线上跨 S243 省道地理位置平面图

该连续梁施工为节点控制性工程, 直接制约着架梁的顺利进行及项目的总工期, 施工时间为 2016 年 8 月—2017 年 2 月。

### 1.1 施工环境

该拟建高架桥梁施工环境极为复杂, 桥梁沿线前部有沟塘, 后部有山体, 上跨高速省道, 下穿高压

线。具体情况如下:

1) 施工周边环境:桥梁上跨省道 S243,省道桥梁两侧外边缘至拟建高架 B34、B35 墩柱水平净距分别为 25 m 和 22 m,上跨梁底至省道桥面净高约为 5.5 m;省道 S243 日常交通流量较大,高架桥施工不得影响其正常运行;在 B35—B36 墩柱间上方横跨一条 220 kV 科漂 ZY49 高压线。

2) 地质条件:B33—B34 墩柱跨现浇梁现状场地为鱼塘,土体承载力极差;根据勘察报告,里程 YDK8+551.3 左 1.6 m (近 B35 号墩)处主要为素填土、强风化安山质凝灰岩及中风化安山质凝灰岩。

3) 冬季施工条件:工程施工期主要在冬季,施工环境温度较低。

## 1.2 施工难点

1) 在悬臂浇筑连续梁 0<sup>#</sup>块时,由于受现场施工条件限制,需在狭小的高空区域完成大体积混凝土浇筑。施工环境地质条件变化较大,若采用常规支架体系,则对 0<sup>#</sup>块附近场地进行大规模处理后才能严格控制 0<sup>#</sup>块的沉降。该方法使用材料多,施工占地面积较大,在地质情况复杂、空间狭窄的情况下,钢管斜向布置施工安全风险较大,且存在支架体系沉降不均的问题。

2) 悬臂浇筑连续梁体积大、质量大,整体结构需在高空移动,施工周期长、难度大,技术要求高。悬臂浇筑连续梁在冬季施工时,如何做好挂篮跨路安全防护和冬季蒸养工作是工程施工阶段必须解决的一个难题。

## 2 关键施工技术

针对跨 S243 省道悬臂浇筑连续梁施工过程中存在的难点,通过技术研究,开发出一套关键施工技术,包括新型的 0<sup>#</sup>块支架体系以及挂篮防护蒸养一体化系统,搭配以空间需求较小的三角挂篮及平头塔吊,解决了复杂地质、狭小施工空间的挂篮跨路安全防护以及冬季蒸养的难题。

### 2.1 悬浇段 0<sup>#</sup>块新型支架体系

悬浇段 0<sup>#</sup>块新型支架体系的核心主要是基于现有结构承台,优化结构形式、合理分配上部结构荷载,既作为中墩临时固结,又作为 0<sup>#</sup>块混凝土的支架。

#### 2.1.1 悬浇段 0<sup>#</sup>块新型支架体系设计

##### 2.1.1.1 设计选型

0<sup>#</sup>块临时固结支墩主要起到两方面作用:一是

作为主梁悬臂浇筑时的临时固结支墩;二是作为 0<sup>#</sup>块段的现浇混凝土支架。经设计选型,确定该支架体系详细构造如图 2~3 所示。

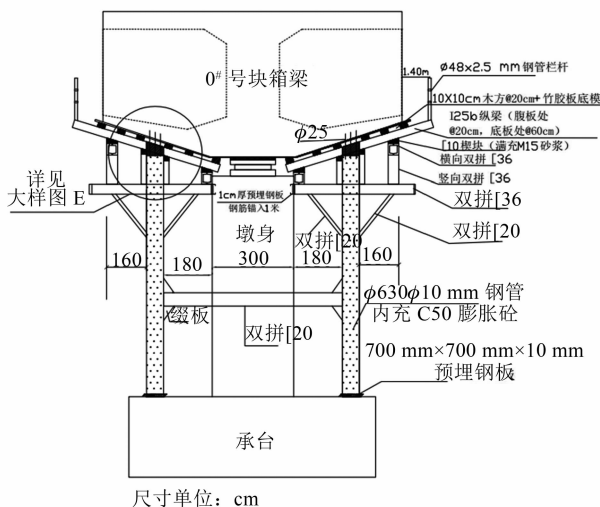


图 2 连续梁悬臂浇筑施工 0<sup>#</sup>块节段新型支架纵向立面图(含临时固结)

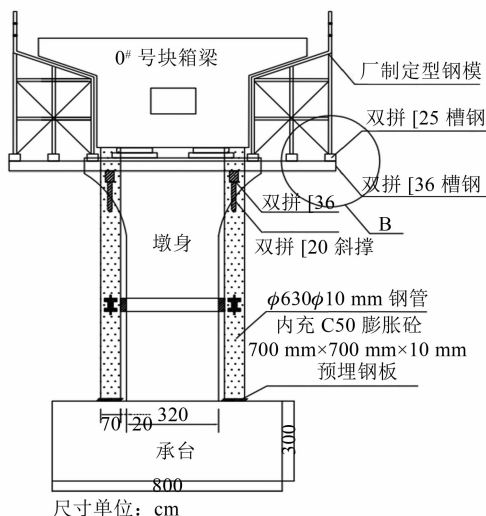


图 3 连续梁悬臂浇筑施工 0<sup>#</sup>块节段新型支架横向立面图(含临时固结)

#### 2.1.1.2 计算模型及主要参数

利用 Midas 有限元软件建立了 0<sup>#</sup>块节段新型支架体系有限元模型,如图 4 所示。

1) 材料特性——普通杆件材料均选用 Q345 钢材,钢管混凝土立柱采用 Q345 钢管与 C50 混凝土组合材料。

2) 单元划分——模型均为梁单元,纵向分配梁按模板木方 20 cm 间距划分,横向分配梁与纵向分配梁节点对应划分,其他单元根据情况划分。控制单元长度不大于 1 m,共 1 480 个节点、1 464 个单元。

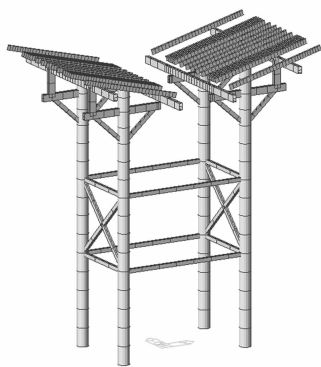


图4 0#块节段新型支架体系有限元模型示意图

3) 边界条件——柱底及与桥墩接触的点刚接。

4) 荷载——恒载自重;对于托架的预压质量取值,梁段混凝土的超灌系数按1.03计,超压系数为混凝土质量的120%,则0#块每个单侧需要预压的质量为205.9 t;因箱梁横断面下纵向分配梁间距不同,划分腹板、底板、翼缘区域的相应荷载,按面积占比原则划分,并考虑附加钢模板质量,各区域荷载施加在纵向分配梁节点上;对于施工活荷载,3.5 kN/m<sup>2</sup>的荷载施加在纵向分配梁节点上。

#### 2.1.1.3 主要验算结果

1) 强度验算——单元应力峰值出现在主横梁及纵向分配梁上(见图5),最大单元应力 $\sigma_{\max} = 246 \text{ MPa} < [\sigma] = 305 \text{ MPa}$  ( $[\sigma]$ 为容许应力),满足要求。

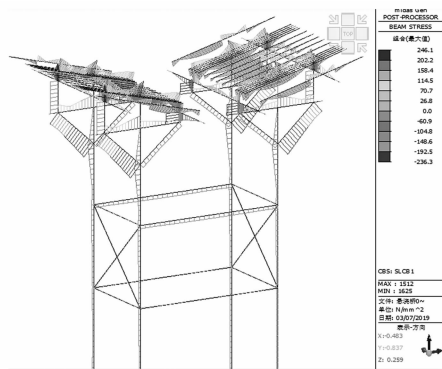


图5 0#块节段新型支架体系应力计算云图

2) 刚度验算——经计算,所有构件挠度值 $\nu$ 均小于容许挠度值 $[\nu]$ 。其中, $(\nu/[\nu])_{\max}$ 出现在纵向分配梁上,数值为0.78。

3) 稳定性验算——部分主要构件稳定性验算结果如下:纵向分配梁的绕y轴弯矩 $M_y = -7.435 \times 10^7 \text{ N}\cdot\text{mm}$ ,绕z轴弯矩 $M_z = -7.789 \times 10^5 \text{ N}\cdot\text{mm}$ ,对y轴抗弯截面系数 $W_y = I_y/z = 4.222 \times 10^5 \text{ mm}^3$  ( $I_y$ 为对y轴的惯性矩,z为下边缘至y轴距离),对z轴

抗弯截面系数 $W_z = I_z/y = 5.039 \times 10^4 \text{ mm}^3$  ( $I_z$ 为对z轴的惯性矩,y为截面下边缘至中性轴距离),工字钢z轴截面塑性发展系数 $\gamma_z = 1.20$ ,梁的整体稳定性系数 $\varphi_b = 1.00$ ,算得 $M_y/(\varphi_b W_y f) + M_z/(\gamma_z W_z f) = 0.56 \leq 1.0$  ( $f$ 为抗弯强度设计值),满足规范要求。

根据GB 50017—2017《钢结构设计规范》中公式(6.2.7-1)计算得到长细比 $\lambda_e = 2.17$ ,进而查规范附录D表D-2得到稳定系数 $\varphi_d = 0.99$ ,算得 $M_y/(\varphi_d W_y f) = 0.52 \leq 1.0$ ,满足规范要求。

牛腿撑杆的轴力设计值 $N = 1\,047\,922 \text{ N}$ ,长细比 $\lambda_z = 44.5$ ,相应查得 $\varphi_b = 0.88$ ,算得 $N/(\varphi_b A f) = 0.66 < 1$  ( $A$ 为构件的毛截面面积),满足规范要求。

支撑立柱构件计算长度 $l_{0y} = \mu_y l = 1 \times 5\,000 \text{ mm} = 5\,000 \text{ mm}$  ( $\mu_y$ 为绕y轴方向杆件计算长度系数, $l$ 为实际杆长), $l_{0z} = \mu_z l = 1 \times 5\,000 \text{ mm} = 5\,000 \text{ mm}$  ( $\mu_z$ 为绕z轴方向杆件计算长度系数)。依据JGJ 138—2016《组合结构设计规范》第8.1.2条:套箍指标 $\theta = 0.88$ ,进而查表8.2.1得同混凝土强度有关的系数 $\alpha = 2$ ,柱的等效计算长度 $L_e = 5\,000 \text{ mm}$ , $L_e/D = 7.9$  ( $D$ 为钢管的外直径),则:圆形钢管混凝土轴心受压柱考虑长细比影响的承载力折减系数 $\varphi_l = 1 - 0.115\sqrt{L_e/D - 4} = 0.773$ ,柱端较大弯矩设计值 $M = 8\,671\,868 \text{ N}\cdot\text{mm}$ ,轴向压力设计值 $N = 1\,502\,067 \text{ N}$ ,柱端轴向压力偏心距之较大值 $e_0 = M/N = 57.7$ , $e_0/r_c = 0.19$  ( $r_c$ 为核心混凝土横截面的半径),圆形钢管混凝土框架柱和转换柱考虑偏心率影响的承载力折减系数 $\varphi_e = 1/(1 + 1.85e_0/r_c) = 0.74$ 。

根据GB 50017—2017第8.2.3-1条, $N = 1\,502\,067 \text{ N} \leq 0.9\varphi_l\varphi_e f_c A_c (1 + \alpha\theta) = 9\,592\,336.4 \text{ N}$  ( $f_c$ 为钢管抗压强度设计值, $A_c$ 为钢管内的核心混凝土横截面面积),满足规范要求。

#### 2.1.2 悬浇段0#块新型支架体系施工要点

1) 预埋件埋设:在下部结构承台、墩柱钢筋制作安装过程中,随施工进度根据设计图纸要求正确安装好临时固结体系预埋件。钢板表面向墩身内略凹2~3 cm,方便0#块施工结束后钢板面的外观处理。

2) 临时固结钢管及纵向水平杆制作:在承台上放出临时固结底口线,在墩顶上放出纵横向轴线,根据设计图纸确定临时固结钢管支撑的附墩纵向连接件位置。在顶层相应附墩纵向连接件位置处,采取双拼槽钢内穿临时固结钢管柱,并焊接相应支架牛腿进行固定牢靠,如图6所示。

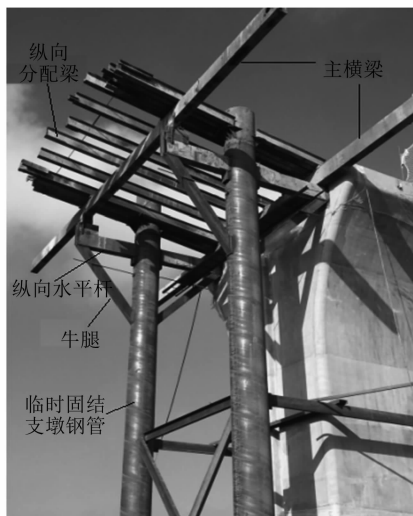


图6 0#块支架实体照片

3) 临时固结钢管及纵向水平杆安装:利用塔吊或汽车吊将临时固结支墩钢管及纵向水平杆吊运至安装现场进行对称安装(见图6)。临时固结钢管及纵向水平杆吊装就位后,将其下口与承台内钢板焊接。纵向水平杆靠近墩身一侧采用焊接方式与墩身预埋钢板相连,形成0#块支架主受力骨架。为保证支架体系的稳定,纵向连接构件分别与墩柱和临时固结钢管进行连接,具体设置数量根据结构尺寸、支架规格、材料参数等综合计算确定为:每个墩柱单侧设置2个,两侧共计4个。

4) 安装支架及楔块:4根主横梁采用双拼槽钢横向布置,分别支承于2个纵向水平杆上,并在主横梁支撑点位置加设竖向加劲板,以避免腹板受压屈曲、主梁侧扭。因0#块箱梁沿着纵向为变截面,为保证任何高度支架主横梁与纵分配梁的接触均为面接触,采用竖向双拼槽钢进行粗调,小于10 cm采用10号槽钢满充砂浆进行精调。

5) 安装支架分配梁:采用工字钢作为支架纵向分配梁,纵向分配梁在主横梁上接触位置采用U形螺栓进行固定,防止两侧悬臂延伸段倾覆。纵横向梁体交汇处每隔10 cm在工字钢腹板上加设一道加劲板,加劲板采用20 mm钢板制作,加设范围超出纵梁宽度20 cm以上。

6) 临时固结钢管混凝土浇筑:临时固结钢管混凝土采用微膨胀混凝土,在临时固结钢管与纵向水平杆交叉区振捣密实,保证连接牢靠。

7) 0#块底模及侧模安装:在分配梁上放置常规施工方木,方木上铺竹胶板作为底模板。0#块翼缘

板采用挂篮外侧模自带的支架,该支架沿桥梁纵向架设于分配梁上,同时安装翼缘模板。

8) 支架预压和高程调整:0#块支架预压最大荷载取支架设计荷载(含施工荷载)的120%。预压范围主要为腹板和翼缘板交点部位,预压采用腹板部位堆钢筋、腹腔部位堆砂袋的方式。加(卸)载按照60%→90%→120%(120%→90%→60%)的加载总重分三级进行均匀加(卸)载。每级加(卸)载后静载时间为3 h(1 h),静载完成后分别测量支架的变形沉降量(卸载测量支架恢复量)<sup>[8]</sup>。最终,根据监测数据分析,各监测点非弹性最大沉降量为4 mm,弹性检测点最大沉降量为4 mm。据此,底模预留沉降量为5 mm。需要注意的是,预压卸载必须在支架完成全部预压加载且变形稳定后方可进行。

9) 钢筋、模板和混凝土施工:箱梁钢筋在钢筋加工厂加工完成后吊运至施工现场安装,经验收合格后再安装内模。后续完成顶板钢筋绑扎和预埋件安装,最后按照底板→腹板→顶板的顺序一次性全断面浇筑箱梁混凝土。

10) 0#支架拆除施工:待0#块按照设计要求进行预应力张拉施工完毕后,切除调节楔块,使支架松动。按照后搭先拆、先搭后拆的原则,从悬臂端到墩身旁进行支架拆除作业。拆除作业仅对0#块支架进行拆除,需保留好临时固结系统,不得破坏。

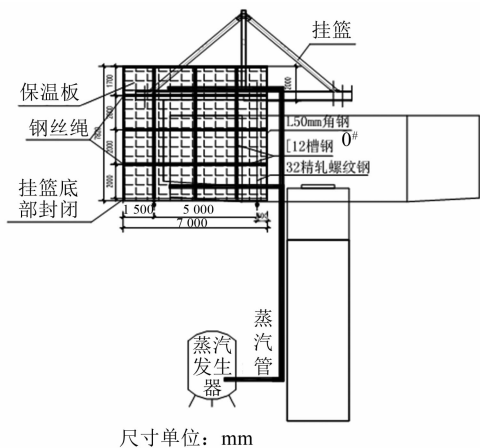
## 2.2 挂篮跨路防护与蒸汽养护暖棚一体化系统

### 2.2.1 养护暖棚与跨路防护施工一体化系统的设计

蒸汽养护暖棚与跨路防护一体化系统整体为钢架结构外包保温板,整个骨架结构采用精轧螺纹钢悬吊固定于挂篮底部的前、后横梁上,与挂篮形成整体共同移动<sup>[9]</sup>。将连续梁保温措施与挂篮全封闭措施有效结合,既可全封闭防止坠物,又可保温防风。搭配以三角挂篮及平头塔吊,可有效保证施工安全及进度。挂篮蒸汽养护暖棚与跨路防护一体化立面图如图7~9。

### 2.2.2 养护暖棚与跨路防护施工一体化系统施工要点

1) 挂篮外防护底平台的施工:在挂篮安装施工完毕后,首先加工挂篮外防护底平台。防护底平台主楞采用20#槽钢“[ ]”形焊接,并留置吊装孔,通过 $\phi 32$  mm精轧螺纹钢吊杆与挂篮的前后底横梁进行连接;防护底平台的次楞采用12#槽钢,间距1 m排列;防护面板采用2 cm厚竹胶板进行底板封闭,以



### 2.2.3 挂篮跨路防护与蒸汽养护暖棚一体化系统应用效果

采用挂篮跨路防护与蒸汽养护一体化系统,大大增强了悬臂浇筑块段冬季施工期间的保温效果,提高了混凝土的养护质量,有效提高了劳动生产率(平均每个节块缩短 2~3 d),同时还保证了悬臂浇筑块段张拉时间,减少了梁体养护与挂篮防护的工序,确保了跨省道 S243 的安全防护,达到了预期效果。

## 3 结论

1) 悬臂浇筑施工 0# 块节段新型支架体系具有体积小、用材省、传力明确等特点,该体系取消了主承力钢管支撑,借助临时固结钢管,将荷载传递至墩柱承台上。在复杂地形、地质条件下,该新型支架体系省去了 0# 块常规支架法施工所需开展的大量地基处理工作,避免了因场地地质条件差异引起的支架体系差异沉降问题。同时,使用材料设备较少,所需作业空间较小,有利于狭小空间条件下施工。此外,由于利用该技术施工时,桥梁墩柱与上部梁体间无需设置临时固结支撑,支座直接承担上部各类荷载,可以最大程度减小支座临时固结解除后所产生的结构次内力。

2) 挂篮蒸汽养护暖棚与跨路防护施工一体化系统,减少了常规挂篮防护的前上横梁、前下横梁和后下横梁的防护平台及钢丝网等防护结构的投

(上接第 120 页)

建议:利用区间中间风井和明挖区间始发盾构,尽量减少从车站始发盾构,可避免相关施工占用车站机电安装及装修施工的直线工期,有利于保障轨行区和车站移交节点。

本文选取了基坑宽度、深度相近的旋挖桩加内支撑和放坡支护两种基坑支护形式从多方面进行对比分析,包括对 19 号线共 11 处提供盾构下井基坑施工的全过程跟踪,得出结论为:采用放坡支护形式的基坑,往往由于各种原因会导致提供盾构下井时间滞后;采用旋挖桩加内支撑形式的基坑,施工便利性好,对地面建构筑物影响小,有利于后期施工,更加安全可控,能确保盾构下井工期。由于本文采用的是约 30 m 深度的基坑进行对比分析,未深入对其它深度的基坑进行分析,故建议成都地铁在砂卵石、泥岩地层中,针对 3 层(一般约 24 m 深)或者 3 层以上深度提供盾构始发的基坑,即使在周

边环境空旷有条件放坡的地区,其围护结构仍采用旋挖桩加内支撑形式。

## 参考文献

- [1] 李孝平,庞凌志. 改建沪蓉铁路小角度上跨宁西下行线设计方案[J]. 铁道建筑,2018(1): 90.
- [2] 靳炳强. 干旱寒冷地区铁路冬季施工混凝土质量控制技术[J]. 铁道建筑,2014(10): 123.
- [3] 雷俊卿. 桥梁悬臂施工与设计[M]. 北京:人民交通出版社,2000.
- [4] 惠小锋. 跨繁忙铁路干线连续梁无防护棚悬臂施工技术[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版),2014(增刊1): 210.
- [5] 崔越超. 上跨既有高速铁路桥梁施工关键技术[J]. 铁道建筑,2017(4): 34.
- [6] 廖满平,丁学正,曹洁. 河道跨现有桥梁大跨度钢管贝雷支架施工技术[J]. 施工技术,2019(17): 41.
- [7] 李磊. 大跨度连续梁桥悬浇施工关键技术研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2018.
- [8] 谢军. 京沪高铁新型花式贝雷梁支架施工设计[J]. 建筑机械,2018(5): 99.
- [9] 王飞,张晓利. 跨既有线连续梁附着式防护棚施工[J]. 铁道建筑技术,2012(12): 113.
- [10] 梁衍涛. 60 m+100 m+60 m 连续梁悬臂施工控制技术与实践[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2018.

(收稿日期:2019-11-06)

## 参考文献

- [1] 周欢,王佳庆,詹谷益. 成都地铁 7 号线膨胀土基坑支护设计[J]. 铁道建筑,2015(7): 68.
- [2] 邓舒,姜振泉,王艳萍,等. 青岛地铁双山站深基坑开挖支护综合分析[J]. 铁道建筑,2014(2): 41.
- [3] 冯慧君. 深圳地铁明挖隧道基坑支护的施工与监测[J]. 铁道建筑,2004(7): 32.
- [4] 王小文,钱春阳. 深基坑支护结构变形及内力有限元分析[J]. 铁道学报,1999(6): 3.
- [5] 杨德春,唐琪. 浅析盾构始发井设计与始发技术应用[J]. 隧道建设,2007(增刊2): 307.
- [6] 宋冶,高尔洋,马德云. 广州地铁 1 号线车站深基坑支护技术述评[J]. 中国铁道科学,1998(4): 3.

(收稿日期:2020-10-23)