

# 上海市轨道交通 3/4 号线宝山路站接轨改造工程中的车站结构改造设计研究

孙天荣

(中铁上海设计院集团有限公司, 200070, 上海)

**摘 要** [目的]上海市轨道交通宝山路站为提高列车通过能力和降低安全风险,需进行线路接轨改造,相应的车站结构也需改造加固。由此梳理出车站结构改造设计中的主要问题、处理方法和对运营的影响控制。[方法]介绍了宝山路站改造工程的概况,阐述了设计原则,确认了设计方法,开展了超限结构性能化设计来验证加固改造后的抗震性能,并提出了针对宝山路站的结构自适性加固改造方案,分析了设计过程中遇到的重难点和解决方法;为保证施工期间车站正常运营,提出了分阶段的施工组织计划。[结果及结论]宝山路站经过改造后,满足了增加股道的要求。通过结构加固,车站的抗震性能可以满足现行规范的要求。车站结构工程的分阶段实施能有效降低对车站运营的影响。

**关键词** 城市轨道交通;车站结构;加固改造;自适性;分阶段施工

**中图分类号** U231.3; U231.4

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2024.01.030

## Structural Renovation Design Study for Shanghai Rail Transit Line 3/4 Joint-rail Project at Baoshan Road Station

SUN Tianrong

(China Railway Shanghai Design Institute Group Co., Ltd, 200070, Shanghai, China)

**Abstract** [Objective] To enhance train throughput capacity and reduce safety risk at Baoshan Road Station in Shanghai rail transit, a track joint-rail renovation is necessary, requiring concurrent reinforcement of station structure. Thus the key issues in station structure renovation and design, countermeasures, and control on operational impact are sorted. [Method] The overview of Baoshan Road Station renovation project is presented, outlining design principles and confirming the design methodology. A code-exceeding structural performance design is conducted to validate the seismic resistance after reinforcement, and the tailored adaptive reinforcement plan for Baoshan Road Station structure is proposed, addressing critical challenges encountered during the design process along with their solutions. To ensure normal station operation during construction

period, a phased construction organization plan is introduced.

[Result & Conclusion] The renovated Baoshan Road Station meets the requirements of additional tracks. Through structural reinforcement, the station seismic resistance can meet requirements of current regulations. Phased station structure engineering can effectively lower various impacts on station operation.

**Key words** urban rail transit; station structure; reinforcement and renovation; adaptive; staged construction

目前,上海市轨道交通 4 号线与 3 号线在共线的宝山路站采用简易接轨方式的连接,其进站方向均未设置安全线。在 3/4 号线信号系统升级改造完成后,行车对数将增加,宝山路站的站前简易接轨将成为 3/4 号线的主要安全风险点。对此,宝山路站接轨改造工程将 4 号线外圈宝山路站站前接轨改为站后接轨,并在宝山路站北侧增加一股道作为 4 号线外圈线,以消除安全隐患。对此,宝山路站车站结构需进行改造加固。本文将以上海市轨道交通 3/4 号线宝山路站接轨改造工程中的车站结构改造(以下简称“宝山路站改造工程”)为对象,整理改造设计中遇到的主要问题、处理方法、既有结构的自适性设计和对运营的影响控制,以期为类似的项目提供参考。

## 1 工程概况

既有宝山路站为路侧高架三层标准侧式站,下跨铁路客车技术整备站,其主体北侧设有 4 层附属用房。宝山路站位置及接轨改造方案示意图如图 1 所示。

宝山路站改造前的断面如图 2 所示。改造前,站台总长度为 150.0 m,有效站台长度为 140.0 m,北侧站台宽度约为 7.5 m,侧站台宽度为 2.8 m。南侧站台宽度约 6.5 m,侧站台宽 2.2 m。宝山路站改造前的照片如图 3 所示。

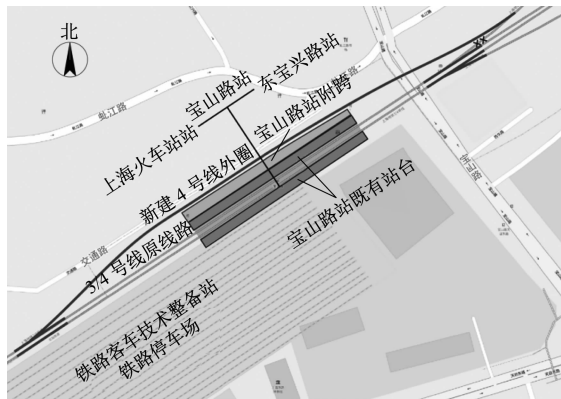


图1 宝山路站接轨改造方案示意图

Fig. 1 Diagram of Baoshan Road Station joint-rail renovation scheme

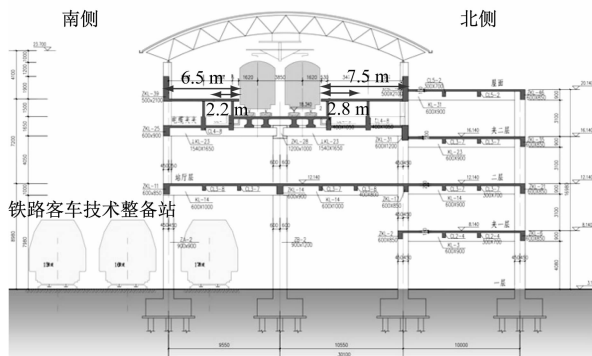


图2 宝山路站改造前断面示意图

Fig. 2 Diagram of Baoshan Road Station profile before renovation



图3 宝山路站改造前照片

Fig. 3 Photo of Baoshan Road Station before renovation

根据改造方案,宝山路站结构有较大调整:北侧既有7.5 m宽侧式站台向北扩建4.5 m,并改造为岛式站台。改造后的岛式站台总宽度为12.0 m;南侧站台拆除既有3部楼梯后封闭楼梯开洞,将既有2.2 m宽侧站台拓宽至3.8 m,并纵向增加楼扶梯;站厅层公共区优化为两端进站、中间出站、非付费区联通模式。此外,宝山路站改造工程还包含更换既有屋面彩钢板、车站北侧新增拱形钢结构屋架、外立面重新装修、车站北侧增加3号出入口等改造内容。宝山路站改造后断面示意图如图4所示,改造后效果如图5所示。

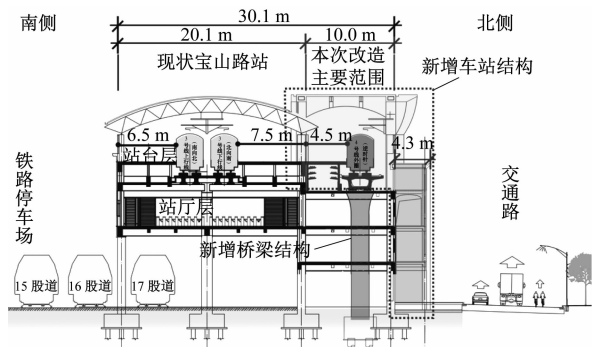


图4 宝山路站改造后断面示意图

Fig. 4 Diagram of Baoshan Road Station profile after renovation



图5 宝山路站改造后效果图

Fig. 5 Renderings of Baoshan Road Station after renovation

宝山路站改造工程通过车站结构内部增加桥梁结构(桩基承台、墩柱及轨道箱梁),既满足了增加股道的要求,又实现了桥梁与既有车站的完全脱离,各自独立计算、设计,避免了建桥合一引起竖向荷载大增,进而导致既有基础承载力不足和设计难度增加。

## 2 宝山路站的结构改造设计

宝山路站改造工程与其他已完成的既有高架车站改造工程相比,具有内容多、范围大、难度高的特点,是对运营车站大型改造的尝试和探索。

### 2.1 设计原则

根据DGJ 08-81-2021《现有建筑抗震鉴定与加固标准》<sup>[1]</sup>,宝山路站改造工程应按照B类建筑进行鉴定和加固;后续使用年限为40年;地震力作用折减系数为0.9;宝山路站改造工程安全等级一级,结构重要性系数1.1,设防分类属重点设防类(简称乙类),结构抗震设防烈度为7度(地震动加速度为0.10g,  $g$  为重力加速度),设计分组为第二组,特征周期  $T_g = 0.9$  s;宝山路站改造工程场地类别为IV类,抗震等级为二级,抗震构造措施应满足抗震烈度8度的相关要求。地基基础安全等级为一

级,设计等级为甲级。新增基础采用钻孔灌注桩。恒载的分项系数取 1.3、活载分项系数取 1.5,网架屋面风压采用 100 年一遇的基本风压等级。

2.2 结构改造设计

2.2.1 建模计算及结构加固

根据设计原则、原结构截面、材料强度和改造后的建筑布置,进行建模,并计算分析。采用 PKPM 软件建立宝山路站主体框架模型,如图 6 所示。采用 SAP 软件建立新建钢屋盖模型,如图 7 所示。将计算结果和既有结构的竣工图比对发现,宝山路站既有混凝土构件存在较多配筋不足的情况,且个别位置截面尺寸不足无法补充配筋。针对以上情况,按照鉴定报告的建议确定加固总体方案:对原设计强度与现计算结果差别较小的构件,采用碳纤维加固法;对原设计强度与现计算结果差别较大的构件,采用粘钢加固法;对截面不足的构件,采用加大截面法;对底层柱,采用外包粘钢加固法。

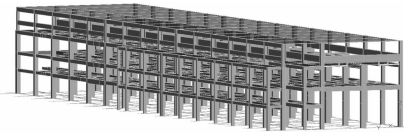


图 6 采用 PKPM 软件构建的宝山路站主体框架模型  
Fig.6 Mainbody framework model of Baoshan Road Station constructed by PKPM software

2.2.2 不规则判定及性能化设计

改造后的车站结构在考虑偶然偏心影响的地



图 7 SAP 软件构建的新建钢屋盖模型  
Fig.7 Newly-built steel roof model constructed by SAP software

震作用下,层间位移最大值大于层间位移平均值的 1.2 倍,但小于 1.4 倍。根据文献[2]的规定,这将形成扭转不规则;首层存在夹层,导致楼板不连续;首层刚度比不满足相邻层刚度变化大于 70% 或连续三层变化大于 80% ,形成竖向刚度突变。根据文献[2-4],宝山路改造工程的结构属于不规则结构,需进行超限多层性能化设计。

综合考虑抗震设防类别、设防烈度、场地条件、结构的重要程度、受力特点、加固措施、震后破坏的影响和修复难易程度等因素,设计方、超限评审专家和建设方共同确定结构的整体抗震性能目标为 D 级,即在多遇多震、设防地震及预估的罕遇地震下,结构抗震性能水准分别为 1、4、5(其中关键构件为首层、穿层框架柱和轨道梁,普通竖向构件为其他框架柱,耗能构件为框架梁)。地震荷载参数取值见表 1。

表 1 地震荷载参数

Tab.1 Parameters for seismic load

地震类型	结构状态	水平地震影响系数最大值	$T_g/s$	场地水平向设计峰值加速度/ ( $m/s^2$ )	阻尼比	周期折减系数	风荷载	材料强度	内力调整系数	荷载作用分项系数	抗震承载力调整系数
多遇地震	弹性	0.072	0.9	0.315	0.05	0.75	计算	设计值	按规范	按规范	按规范
设防地震	弹性	0.207	0.9	0.900	0.05	1.00	不计算	设计值	1	按规范	按规范
	不屈服	0.207	0.9	0.900	0.05	1.00	不计算	标准值	1	1	1
罕遇地震	不屈服	0.405	1.1	1.800	0.06	1.00	不计算	标准值	1	1	1

弹性时程分析采用 2 组人工波和 5 组天然波作为地震波输入,计算得到的结构响应(剪力和位移)与反应谱法计算结果比较接近,故而在施工图设计时,地震作用不需要放大。

静力弹塑性时程分析的推覆方式采用 CQC(完全二次项组合方法)加载模式。计算结果表明:结构存在性能点(需求曲线与能力曲线的交点),最大

层间位移角均小于 1/50;框架柱在性能点位置底部楼层出现轻微损伤,满足预定的性能目标;轨道梁在大震下出现轻微损伤,未达到未达到中度损坏,满足预定的性能目标;能力曲线仍有上升趋势,表明结构经历大震后仍有一定的承载能力;性能点下基底剪力为小震基底剪力的 4.5~5.5 倍,说明结构刚度未出现严重退化。



根据以上计算结果,车站结构采用碳纤维、粘钢、包钢和加大截面等方法加固后,其抗震性能可以满足现行规范的要求。

## 2.3 自适性结构加固方案

### 2.3.1 桥梁基础和基坑方案

在车站范围内,9个桥梁墩柱均落在车站北侧附跨的跨中(车站各层楼板开洞,不破坏主框架),并与附跨结构之间设置宽度为200 mm的抗震缝。轨道箱梁落于墩柱之上,并跨越既有车站结构。

桥梁基础采用承台+非挤土钻孔灌注桩的形式,避开既有车站基础。桥梁基础与车站基础之间的关系如图8所示。既有车站结构局部原有的地下室电缆夹层,在改造后仍需服役。桥梁基础施工时,须破除地下室底板,设置永久施工缝。如图9所示,桥梁承台与地下室底板的永久施工缝采用W型氯丁橡胶防水密封件和环氧粘合剂填实。该密封件为柔性防水,具有一定的变形能力,可以解决地下室新老结构之间的漏水问题。

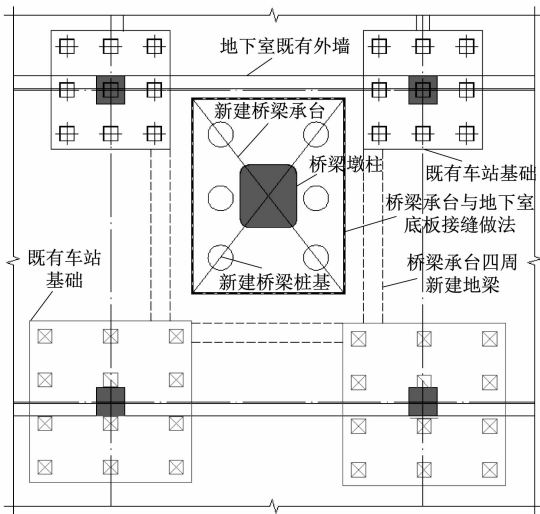


图8 桥梁基础与车站基础之间的关系

Fig.8 Relationship between bridge and station foundations

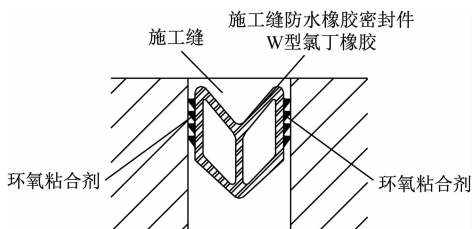


图9 桥梁承台与地下室底板的永久施工缝细部构造

Fig.9 Details in permanent construction gap of bridge abutment and basement slab

桥梁承台施工时,需要在车站内部开挖2.81~

4.18 m深的基坑。该基坑与既有车站基础的水平距离为1倍坑深范围内,根据DG/TJ 08-61—2018《基坑工程技术标准》<sup>[5]</sup>规定,基坑本体风险为三级,环境风险为一级,综合工程风险为一级。基于此,宝山路站改造工程采用拉森Ⅳ型钢板桩进行支护,桩长12 m,插入比1:1.87,坑内采用自然集中排水,并采用Plaxis 3D软件来模拟基坑开挖和钢板桩支护对既有车站结构的影响。模拟得到车站结构竖向变形云图,如图10所示。结果表明基坑临近车站结构柱子竖向位移仅为0.51 mm。

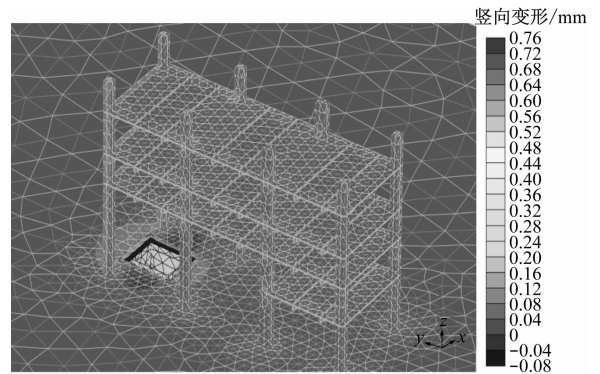
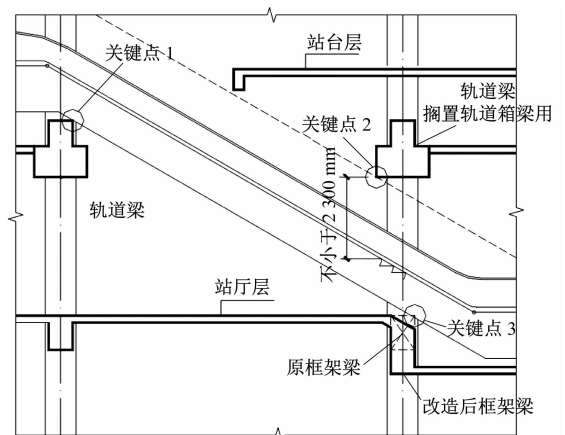


图10 车站结构竖向变形云图

Fig.10 Vertical deformation nephogram of station structure

### 2.3.2 宝山路站南侧新增扶梯改造

在建筑南侧站台上增设了连接站台层和站厅层的自动扶梯,以加强日常竖向交通运输能力和消防疏散能力。新增扶梯剖面图如图11所示。



注:关键点1、2、3为制约扶梯安装位置的点

图11 新增扶梯剖面图

Fig.11 Profile of newly-added escalator

扶梯安装位置受图11中3个关键点的制约。根据扶梯专业人员的调研,选用了市面上厚度最小的扶梯桁架,将扶梯左右移动进行试布置,结果显

示必须从轨道梁和站厅层框架梁中选其一进行部分凿除截断。轨道梁和站厅层框架梁均为框架结构的重要组成部分。其中轨道梁还承受轨道荷载,故其重要性高于只承受人流荷载的站厅层框架梁。一旦将轨道梁破坏,即使加固也无法保证其在车辆疲劳荷载作用下的安全使用性能。由此可知,在别无选择的情况下,只能选择凿除部分站厅层框架梁。此外,站厅层框架梁正下方为客车技术整备站股道,无法落柱托换,最终提出采用 Z 型加固节点。宝山路站站厅层 Z 型加固节点细部构造图如图 12 所示。

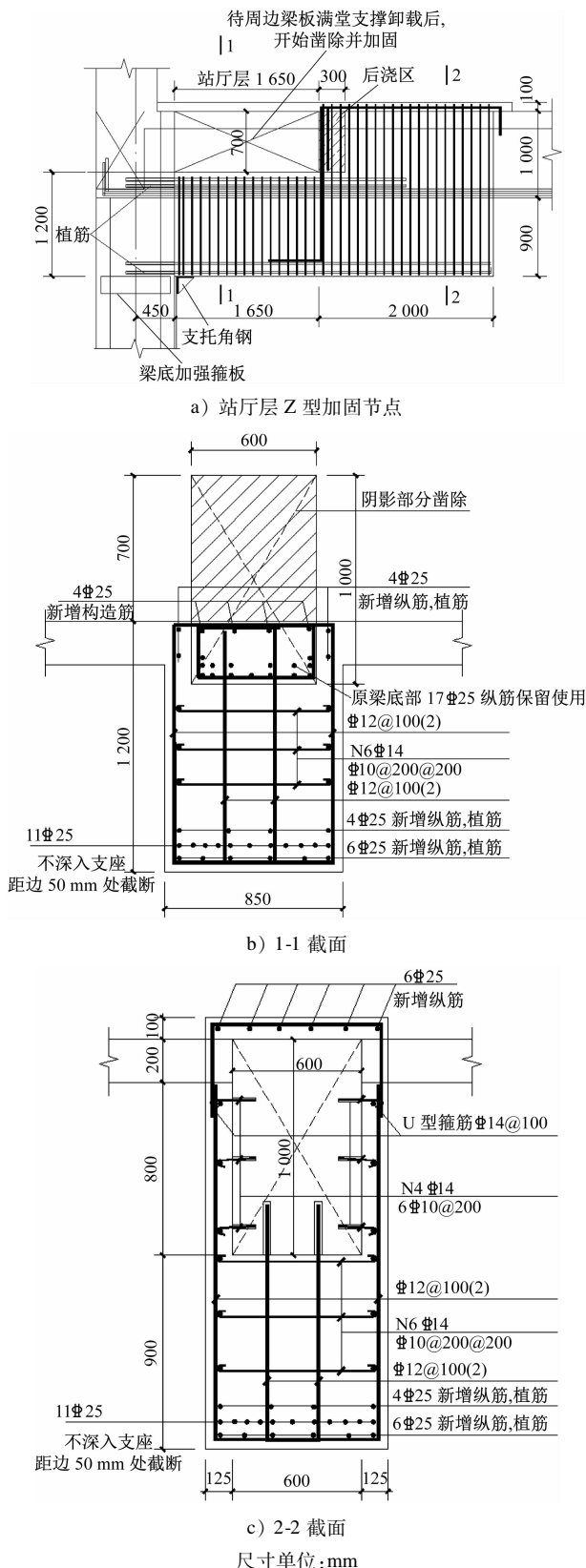
由图 12 b) 可见:1-1 截面处,原梁截面为 600 mm×1 000 mm,改造后梁截面为 850 mm×1 200 mm,改造后梁顶标高下降 700 mm;将原梁下部的 17 根  $\phi 25$  mm 三级钢筋作为 Z 型加固节点的上部钢筋,并在原梁截面两侧新植入 4 根  $\phi 25$  mm 三级钢筋作为加强纵筋;Z 型加固节点下部钢筋 14 根  $\phi 25$  mm 钢筋及 4 根  $\phi 16$  mm 腰筋全部植入框柱,箍筋是 4 排间距为 100 mm 的  $\phi 12$  mm 钢筋;在节点下方设置支托角钢和加强箍板,作为第二道防线。

由图 12 c) 可见:2-2 截面处采用外包加大梁截面法改造;2-2 截面与 1-1 截面的下部钢筋布置一致;由于上部钢筋占用,建筑面层增加 100 mm 厚度;采用上下 2 个 U 形箍筋穿通楼板后焊接;拉筋植筋固定于原梁侧面,拉结箍筋和腰筋。2-2 截面处施工前,相邻两跨框架范围须设置满堂脚手架支撑,加固完成后,混凝土强度须达到 100% 后方可拆除支撑。

### 2.3.3 宝山路站北侧新增钢结构屋架改造

宝山路站北侧新增拱形钢结构屋架,按车站现有纵向的柱跨度(10 m),每 2 跨(即 20 m)设置 1 个支座,并与既有网架结构共用一排框架柱。因既有网架支座预埋板已将柱头占满,故只能将新增钢结构屋架支座设置在框架柱的两侧,并通过植筋增设两个牛腿,进而完成预埋支座。

既有网架和新增钢结构屋架均为空间结构,两者在空间上存在穿插。本文采用 SketchUp 软件建立模型,在设计阶段进行碰撞测试,进而确定拱形高度和弯曲程度,从而保证建筑美观和施工可行性。SketchUp 模型杆件碰撞测试情况截图如图 13 所示。由图 13 可见,圈出部位的新增钢结构屋架的拱形方钢管已与既有网架的上弦杆发生了碰撞,应对新增钢结构拱形屋架进行调整。



注:  $\Phi$  为三级钢筋符号,  $\Phi 25$  表示直径为 25 mm 的三级钢筋;余类推。

图 12 宝山路站站厅层 Z 型加固节点细部构造图截图  
Fig. 12 Screenshot of detailed structural drawing of Z-shaped reinforcement joints on Baoshan Road Station hall level

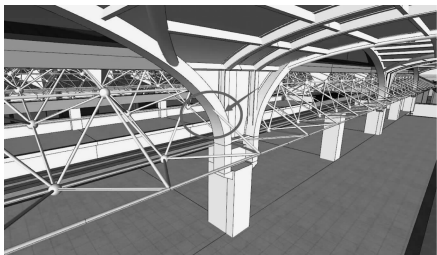


图 13 杆件碰撞测试情况截图

Fig. 13 Screenshot of rod clash test situation

#### 2.3.4 既有网架杆件失稳问题

按照本工程设计原则采用 3D3S 钢结构-空间结构设计软件对既有网架建模计算,结果表明原网架结构个别支座附近的下弦杆存在受压失稳,需增大截面。据分析,这是受本文的荷载分项系数和基本风压取值较高的影响。网架结构是一个整体结构。若要拆除原杆件,则须卸载,将受力状态恢复至吊装前,否则将无法顺利将原杆件旋出。若在不卸载状态下强行拆除原杆件,则对整体网架应力分布影响较大,严重时会造成整片网架坍塌。

对此,宝山路站改造工程采用了外包钢管并注胶的方案来提高失稳弦杆的截面惯性矩,进而降低其长细比。失稳杆件处理方案示意图如图 14 所示。原杆件公称直径为 60 mm,壁厚为 3.5 mm;外包钢管公称直径为 83 mm,壁厚为 6.5 mm。外包钢管由两个半圆管拼合,采用对称并间断焊接(减少残余应力),外包钢管端部与螺栓球焊接堵漏,并在两端和中部预留的注胶孔中由下往上灌满环氧注胶。外包钢管并注胶的方案既能解决既有网架下弦杆失稳的问题,又能避免网架单杆的拆卸更换。

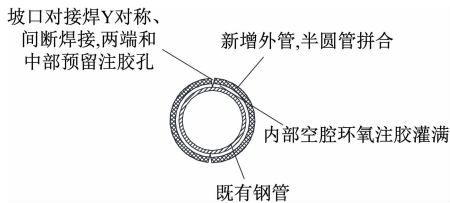


图 14 失稳杆件处理方案

Fig. 14 Treatment scheme of unstable rod

### 3 改造对车站运营的影响控制

地铁运营部门要求宝山路站在改造期间保持正常运营,仅在区间箱梁吊装并接轨时停运 7 d 左右(春节假期)。宝山路站改造工程的改造内容多、范围大,且无法封闭施工,对施工组织是很大的

挑战。

#### 3.1 更换既有屋盖的屋面板

更换既有屋盖的屋面板时,应保证新屋面恒载不大于原结构设计恒载。对此,须与新屋面厂家做好设计协调工作,落实荷载、采光、防水等设计措施。屋面更换时间为天窗期(非运营时间),需每日请点施工。每日施工前,应做好本次施工内容计划,做好吊装、安装和防护准备工作,确保本次施工内容可以在请点时间内按时完成,不可产生临时工程,留下隐患。每日对工区的接触网、轨道和站台做好施工中的观察和施工后的检查,以确保次日车站的正常运营。

#### 3.2 车站结构的拆除和加固施工

车站结构的拆除和加固部位主要位于附跨、站厅和站台位置。

附跨处拆除和加固的施工条件较好,其施工不会影响到车站的运营。在该部位实施拆除和加固前,应对相关结构做好有效支撑,对既有管线做好排摸和保护。

站厅和站台处的拆除和加固对车站运营影响较大。在该部位实施拆除和加固前,除了做好结构有效支撑及摸排保护管线外,还应做好工区隔离,以及冷却水的导流、收集和排出工作。在车站内部无法使用大型吊机,拆除时切割块体应尽量小,并采用人工外运。

宝山路站改造工程在施工期间需保证车站正常运营。联合建筑、结构、施工及车站运营、维保部门共同协商后确定,采用分阶段实施的方法。宝山路站改造工程分阶段施工区域示意图如图 15 所示。按阶段逐次围蔽施工区域,未围蔽区域中的站厅、站台、竖向通道和出入口足以保证车站的正常运营。



图 15 宝山路站改造工程分阶段施工区域示意图

Fig. 15 Schematic diagram of Baoshan Road Station renovation project phased construction area

3 个阶段施工完成后,再临时封闭 3 号口,完成车站区域内桥梁吊装、新建钢结构屋架吊装等车站北侧剩余工程。

### 4 结语

本文对上海市轨道交通 3/4 号线宝山路站开展



结构改造设计研究,探索了既有高架车站结构改造设计的原则和方法,对设计过程中遇到的问题提出了可实施的解决方法,并对施工期间造成的运营影响和分阶段实施方案进行了分析,确保地铁不间断运营。

由宝山路站改造工程的结构设计研究的经验总结,本文对运营车站的改造项目提出如下建议:

1) 结构专业应在车站改造的方案阶段就深度介入,并相对其他专业要提前一个阶段进行深化设计,这样才能做到方案切实可行。

2) 大型改造项目可参考本文所提设计原则,确定改造方法和自适性结构设计方案,开展结构改造加固,加强竣工图研读和现场踏勘,做到因地制宜。

3) 运营车站改造项目须评估改造施工对车站运营的影响。设计方应会同运营方、维保方及施工方共同确定分区施工方案,以确保施工期间车站的正常运营。

部分上海轨道交通既有线已服役 30 余年,其运力和技术上都到了亟需提升的阶段。类似提质增效的改造项目会越来越多,本文可为类似项目提供借鉴。

## 参考文献

- [1] 上海市住房和城乡建设管理委员会. 现有建筑抗震鉴定与加固标准: DGJ 08 - 81—2021 [S]. 上海: 同济大学出版社, 2021.
- Shanghai Housing and Urban-Rural Construction Management Committee. Standard for seismic appraisal and strengthening of existing building: DGJ 08 - 81—2021 [S]. Shanghai: Tongji U-

niversity Press, 2021.

- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高层建筑混凝土结构技术规程: JGJ 3—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for concrete structures of tall building: JGJ 3—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [4] 吕西林. 超限高层建筑工程抗震设计指南 [M]. 2 版. 上海: 同济大学出版社, 2009.
- LYU Xilin. Seismic design guidelines for tall buildings beyond the scope of design codes [M]. 2nd ed. Shanghai: Tongji University Press, 2009.
- [5] 上海市住房和城乡建设管理委员会. 基坑工程技术标准: DG/TJ 08 - 61—2018 [S]. 上海: 同济大学出版社, 2018.
- Shanghai Housing and Urban-Rural Construction Management Committee. Technical code for excavation engineering: DG/TJ 08 - 61—2018 [S]. Shanghai: Tongji University Press, 2018.

- 收稿日期:2023-03-06 修回日期:2023-05-28 出版日期:2024-01-10  
Received:2023-03-06 Revised:2023-05-28 Published:2024-01-10
- 作者:孙天荣,高级工程师,suntianrong@sty.sh.cn
- ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

## (上接第 166 页)

- JIANG Gonghua, XIANG Zhouchen. Research on the estimation method of compensation efficiency of clay compaction grouting [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(4): 942.
- [8] 周佳媚, 刘欢, 张迁, 等. 考虑浆液稠度变化的盾构壁后注浆扩散模型 [J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(3): 710.
- ZHOU Jiamei, LIU Huan, ZHANG Qian, et al. Backfilled grouting diffusion model of shield tunnel considering variation of slurry consistency [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(3): 710.
- [9] 孔祥言. 高等渗流力学 [M]. 2 版. 合肥: 中国科学技术大学

出版社, 2010.

KONG Xiangyan. Advanced seepage mechanics [M]. 2nd ed. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2010.

- 收稿日期:2021-09-10 修回日期:2023-12-20 出版日期:2024-01-10  
Received:2021-09-10 Revised:2023-12-20 Published:2024-01-10
- 通信作者:查丽娟,讲师,chalijuan450001@163.com
- ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license