

# 地下车站装配式双 H 型钢支撑设计及应用<sup>\*</sup>

王 皓

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉//高级工程师)

**摘 要** 目的:为了解决地下车站深基坑工程中钢筋混凝土支撑存在的施工难度大、不可重复使用、经济效益低等问题,应深入研究该支撑结构的受力机理及施工使用特点。方法:提出了一种适用于地铁车站工程的新型装配式双 H 型钢支撑,并对该支撑截面和连接节点进行了设计分析。采用 ABAQUS 软件建立了装配式双 H 型钢支撑及其拼接节点的有限元模型,分析了其轴压性能及支撑拼接节点受弯性能。分析了双 H 型钢支撑的经济效益和社会效益。结果及结论:新型装配式双 H 型钢支撑及其连接节点承载力满足现行规范和实际工程要求,并已成功应用于无锡至江阴城际轨道交通工程南门站工程项目中。装配式双 H 型钢支撑与现浇钢筋混凝土支撑相比较,在重复使用 5 次的条件下,可节约 35% 的经济成本,同时可以减少 68% 的碳排放量。

**关键词** 地铁车站;双 H 型钢支撑;连接节点;轴压性能;受弯性能;碳排放

**中图分类号** U231.4

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2023.09.013

## Design and Application of Prefabricated Double H-shaped Steel Struts in Underground Station

WANG Hao

**Abstract** **Objective:** To address the challenges related to reinforced concrete struts in underground station deep foundation pit engineering, such as the construction difficulties, non-reusability, and limited economic and social benefits, the load-bearing mechanism and construction characteristics of such support structures should be studied in-depth. **Method:** A new prefabricated double H-shaped steel strut (abbreviated as DHSS) suitable for metro station projects is proposed, and a design analysis of its cross-section and connection nodes is presented. A finite element (FE) model of the prefabricated DHSS and its joint nodes is developed using ABAQUS software to analyze its axial compression performance and bending behavior at the joint nodes. The economic and social benefits of DHSS are analyzed. **Result & Conclusion:** The new prefabricated

DHSS along with its connection nodes, meets current specifications and practical engineering requirements. It has been successfully applied to the Nanmen Station of the Wuxi-Jiangyin Intercity Rail Transit project. Compared to cast-in-place reinforced concrete struts, the prefabricated DHSS can save costs by 35% and reduce carbon emissions by 68% after being re-used five times.

**Key words** metro station; double H-shaped steel strut; joint node; axial compression performance; bending performance; carbon emission

**Author's address** China Railway Siyuan Survey and Design Group Co. Ltd., 430063, Wuhan, China

随着经济的快速发展,能源匮乏、气候变暖等问题也日益突出。建筑业作为我国国民经济的支柱产业,面临碳排放较大和能耗较高等问题,是目前我国节能减排的重点领域之一。减少建筑业碳排放,对实现我国节能减排目标具有重大意义。钢筋混凝土支撑是地下车站深基坑工程中常用的支撑形式之一,具有强度高、整体性好、安全稳定等优点,但也存在施工难度大、不可重复使用、经济效益低等问题。基于此,本文依托无锡至江阴城际轨道交通工程南门站工程,提出了一种适用于地铁车站的新型装配式双 H 型钢支撑。根据项目需求针对此种装配式双 H 型钢支撑进行了截面及节点设计,对此种装配式双 H 型钢支撑及其连接节点分别进行了轴压和受弯数值模拟,介绍了该装配式双 H 型钢支撑在实际工程中的应用,并对其经济效益进行了分析。

## 1 双 H 型钢支撑截面及节点选型

无锡至江阴城际轨道交通工程南门站为地下二层岛式车站,位于虹桥南路与规划长庆路交叉路口。根据车站结构型式不同,车站可分为端头井段

<sup>\*</sup> 国家重点研发计划项目(2018YFC0808702,2019YFC0605100)

及标准段:端头井段基坑深约为 19.25 m,宽约为 23.80 m;车站主体标准段基坑深约为 17.74 m,宽约为 19.70 m。根据主体基坑周边环境、基坑特点、水文地质等因素确定主体基坑围护结构采用地下连续墙+内支撑的支护形式。第一道支撑通常采用混凝土支撑,用于安全保障和增加安全冗余度,确保在风险来临时有足够的安全储备。其余 2 道支撑均采用直径 800 mm(厚度 20 mm)的钢支撑。

现设计一种装配式钢支撑替代第一道混凝土支撑,并使该装配式钢支撑达到和混凝土支撑相当的强度及较为合理的刚度。装配式钢支撑由肢件和缀材组成,在同等承载能力下,比实腹式支撑自重更轻;且装配式支撑绕实轴和虚轴的长细比相较于实腹式支撑更小,稳定性更好,适合作为基坑支撑。H 型钢生产安装方便,抗弯能力强,但其两个主轴的惯性矩相差极大,使其不宜单独作为轴心受力构件<sup>[1]</sup>,因此设计了一种以 H 型钢作为肢件、以缀板进行连接的装配式双 H 型钢支撑。

根据文献[2]中轴心受压 H 型钢构件毛截面屈服承载力、净截面断裂承载力和稳定承载力计算公式的计算结果可知,文献[3]表 1 中的 HN800 mm×300 mm 型号 H 型钢能够满足实际工程需要,并计算出了双 H 型钢支撑绕实轴和虚轴的稳定承载力分别为 11 562 kN 和 11 520 kN。装配式双 H 型钢支撑及连接节点如图 1 所示。支撑总长度为 19.7 m,共分成 5 段;每段长分别为 1.83 m、5.50 m、5.00 m、5.50 m 和 1.83 m,各分段间隔为 10 mm;各分段间通过螺栓连接节点进行连接。腹板处采用 48 个 10.9 级 M30 高强度螺栓与 10 mm 厚拼接板连接,翼缘处采用 64 个 10.9 级 M27 高强度螺栓与 18 mm 厚拼接板连接,弯矩传递效率可以达到 80%,接近刚性节点。装配式支撑端部采用 H 型钢混凝土短梁与冠梁形成刚性连接,如图 1 d)所示。

## 2 双 H 型钢支撑及其拼接节点受力性能研究

### 2.1 轴压性能分析

采用大型有限元分析软件 ABAQUS 建立双 H 型钢支撑精细化数值模型(见图 2),对轴压全过程进行数值模拟。装配式双 H 型钢支撑有 448 颗螺栓,为了减少模型的单元数量和计算时间,不建立螺栓相关模型。模型各部分均采用 8 节点六面体线性减缩积分单元(C3D8R)进行网格划分,单元尺寸

为 50 mm×50 mm×50 mm(长×宽×高),共有 79 324 个单元。双 H 型钢支撑右端截面耦合参考点为 RP1,对参考点施加 z 方向位移,同时约束其他方向的自由度;左端截面耦合参考点为 RP2,并固定约束。缀板、翼缘拼接板,以及腹板拼接板与型钢间均为绑定约束。模型所用材料均为 Q355 钢材,材料参数按照文献[2]进行取值:弹性模量为 206 000 MPa,屈服强度为 355 MPa,抗拉强度为 550 MPa。

对已建立的双 H 型钢支撑有限元模型进行特征值屈曲分析,分别得到第 7 阶支撑绕虚轴弯曲和第 11 阶支撑绕实轴弯曲的两种屈曲模态,如图 3 所示。后续分别取包含有支撑绕虚轴和实轴整体弯曲的模态作为支撑的初始缺陷形状。初始缺陷幅值参照文献[2]取值为 50 mm。

开展考虑几何和材料非线性的双非线性有限元分析,分别以支撑绕虚轴弯曲和绕实轴弯曲作为初始缺陷状态,得出双 H 型钢支撑的荷载-位移关系曲线,如图 4 所示。由图 4 可知,当以支撑绕虚轴屈曲作为初始缺陷时,在荷载达到 17 132 kN 以前,荷载-位移曲线近似为一条直线,整体处于弹性阶段;在荷载达到 18 203 kN 后,位移继续增加,荷载开始下降,表明支撑发生了整体失稳。以支撑绕实轴屈曲作为初始缺陷时,在荷载达到 17 456 kN 以前,荷载-位移曲线近似为一条直线,表明支撑整体处于弹性状态;在荷载达到 18 731 kN 后曲线弯曲,位移继续增加,荷载缓慢上升。

以支撑绕虚轴屈曲作为初始缺陷进行数值分析,提取 18 203 kN 时支撑整体应力云图,如图 5 a)所示。由图 5 a)可见,端部腹板和翼缘部分屈服,最大应力为 357.7 MPa,略高于钢材屈服强度。H 型钢支撑侧向最大位移为 24.9 mm,因此认为 H 型钢支撑发生了整体弹塑性失稳和局部失稳。

以 H 型钢支撑绕实轴屈曲作为初始缺陷进行数值分析,提取 18 731 kN 时的整体应力云图,如图 5 b)所示。由图 5 b)可见,支撑整体应力分布较为均匀,各处翼缘与腹板均存在部分屈服,最大应力为 356.7 MPa,略高于钢材屈服强度。

### 2.2 连接节点受弯性能分析

将该 H 型钢支撑截面尺寸代入文献[2]中的装配式双 H 型钢支撑连接节点受弯承载力计算公式,计算得到双 H 型钢支撑节点绕实轴的弯矩承载力为 1 750 kNm。

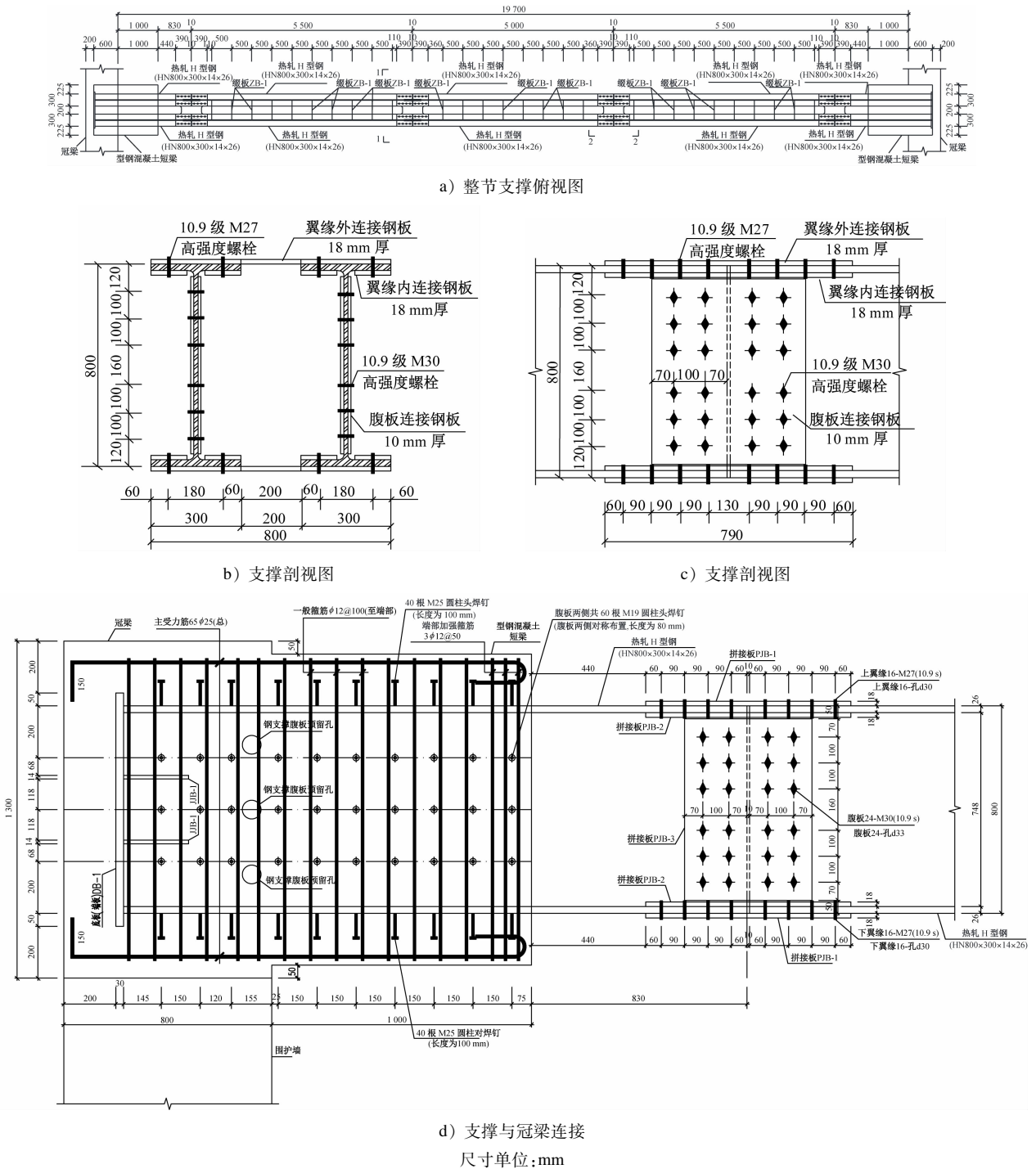


图 1 装配式双 H 型钢支撑及连接节点图

Fig. 1 Diagram of prefabricated double H-shaped steel struts and joint nodes

采用大型有限元分析软件 ABAQUS 建立双 H 型钢支撑螺栓连接节点精细化数值模型 (见图 6), 对节点受弯全过程进行数值模拟。模型各部分均采用 C3D8R 实体单元进行网格划分, 螺栓单元尺寸为  $8\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 8\text{ mm}$  (长  $\times$  宽  $\times$  高), 其余部位网格尺寸为  $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$  (长  $\times$  宽  $\times$

高), 共有 72 780 个单元。支撑右端截面耦合参考点为 RP1, 并施加  $x$  方向转角; 左端截面耦合参考点为 RP2, 并固定约束。除缀板与 H 型钢间采用绑定约束外, 其余部分均建立面接触。根据文献 [5-7], 螺栓预紧力采用螺栓荷载 (bolt-load) 进行施加, 螺栓与连接件之间采用面接触, 法向作用设置为

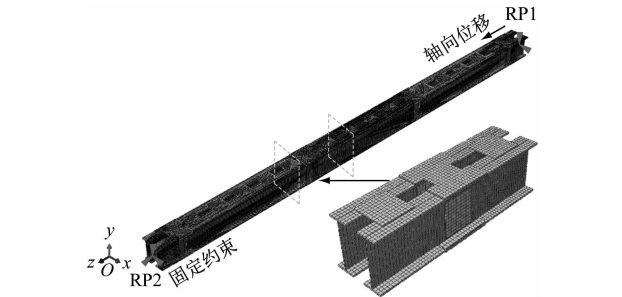


图2 双H型钢支撑有限元模型网格划分及边界条件  
Fig.2 Mesh subdivision and boundary condition of double H-shaped steel strut FE model



图3 双H型钢支撑屈曲模式

Fig.3 Bending mode of double H-shaped steel strut

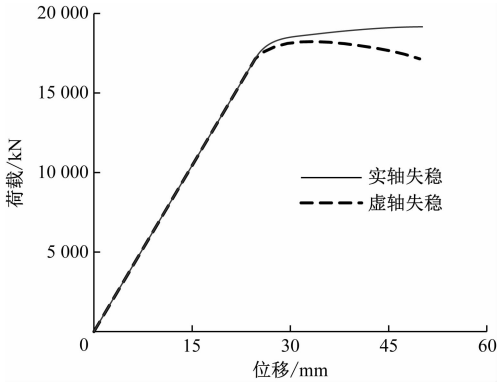


图4 双H型钢支撑荷载-位移关系曲线

Fig.4 Load-displacement relation curve of double H-shaped steel struts

硬接触,切向作用采用库伦摩擦,摩擦系数设置为0.3,能较好地模拟螺栓的力学性能。模型所用材料与本文2.1节中的一致。

基于建立的有限元模型开展非线性有限元计算分析,得到该节点的弯矩-转角关系曲线,如图7所示。由图7可知,在弯矩达到2 765 kNm以前,曲线近似直线,表明该节点整体处于弹性工作状态;在弯矩达到2 765 kNm后,曲线弯曲,表明该节点部分区域进入塑性工作状态;在弯矩达到3 374 kNm时,计算结束。

提取弯矩为2 765 kNm、3 374 kNm时该节点的



a) 绕虚轴失稳应力云图



b) 支撑绕实轴屈曲应力云图

图5 H型钢支撑应力云图

Fig.5 Stress nephogram of H-shaped steel strut

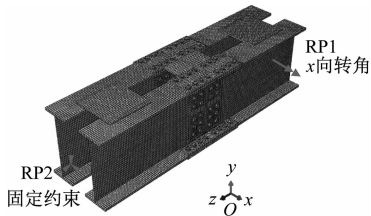


图6 双H型钢支撑有限元模型连接节点网格划分与边界条件

Fig.6 Mesh subdivision and boundary condition of double H-shaped steel strut FE model joint nodes

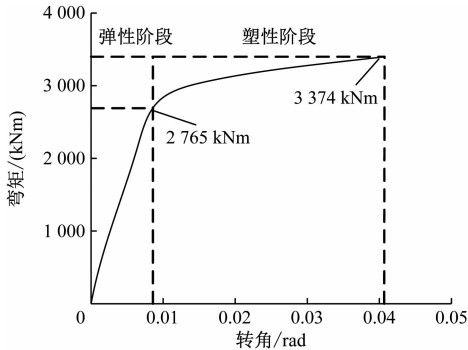
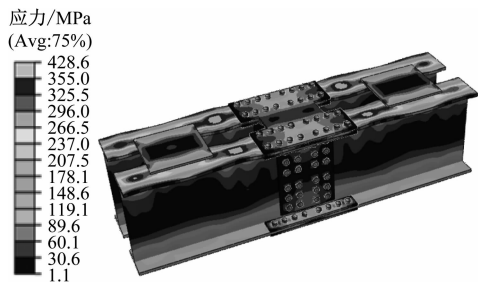


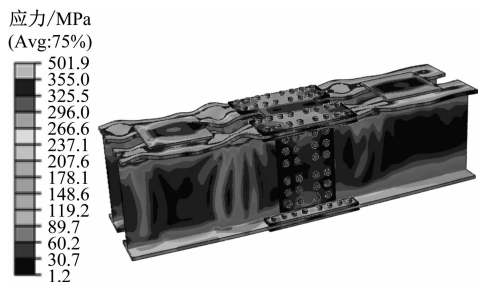
图7 双H型钢支撑连接节点弯矩-转角曲线

Fig.7 Moment-rotation angle curve of double H-shaped steel strut joint nodes

应力云图,如图8所示。在弯矩达到2 765 kNm时,H型钢支撑上翼缘受压屈服,最大变形为21.4 mm,腹板应力偏小,最大变形为7.5 mm。翼缘螺栓应力



a) 弯矩为 2 765 kNm 时应力云图



b) 弯矩为 3 374 kNm 时应力云图

图 8 双 H 型钢支撑连接节点应力云图

Fig. 8 Stress nephogram of double H-shaped steel strut joint nodes

大于腹板螺栓应力,且翼缘螺栓主要承受剪力,最大应力为 428.6 MPa。在弯矩达到 3 374 kNm 时,H 型钢上翼缘屈服区域扩散,上翼缘最大变形为 61.9 mm,腹板最大变形为 27.8 mm,螺栓仍未屈服,应

力最大为 501.9 MPa,且翼缘拼接板处螺栓应力大于腹板拼接板处螺栓。可知该节点处螺栓连接强度大于双肢强度,且屈服弯矩为 2 765 kNm。

### 3 工程实践

该装配式双 H 型钢支撑已成功应用于无锡至江阴城际轨道交通工程南门站工程。如图 9 所示,第一道即为装配式双 H 型钢支撑,强度高、稳定性好、施工迅速、安装拆卸方便。该支撑具体施工流程为:① 在工厂预制装配式双 H 型钢支撑;② 将各段支撑运输至现场,使用高强度螺栓与拼接板对 2 m、5 m 和 6 m 长分段支撑进行灵活组合连接,拼接成符合基坑宽度的整节支撑;③ 进行基坑围护施工,开挖基坑至冠梁底标高;④ 在基坑内架设基坑定位支架,使用龙门吊将连接好的整节支撑吊至预定的位置;⑤ 浇筑冠梁,使装配式双 H 型钢支撑与冠梁连接成一个整体;⑥ 主体结构完成后拆卸中间节点螺栓,将整节支撑吊运至基坑外,在基坑外逐节拆卸高强度螺栓;⑦ 拆卸完成后将各段支撑转运至其他工地重复使用。该工程支撑压力设计值最大为 1 805 kN,达到数值模拟屈服荷载的 11%,认为该装配式双 H 型钢支撑可重复使用。



图 9 装配式双 H 型钢支撑工程应用

Fig. 9 Engineering application of prefabricated double H-shaped steel struts

### 4 效益分析

根据装配式双 H 型钢支撑的承载能力设计相应的钢筋混凝土支撑,并将装配式双 H 型钢支撑与钢筋混凝土支撑进行对比。使用较高强度等级混凝土制成的钢筋混凝土支撑在破除时会因混凝土强度较大而增加施工难度,因此工程上往往使用 C30 或 C35 混凝土制作钢筋混凝土支撑。使用 C30 强度等级的混凝土,根据文献[4]中的计算公式设计相应的钢筋混凝土支撑,经计算,截面尺寸为 1 000 mm × 1 000 mm、配置 25 根  $\phi$  12HRB335 普通纵向钢筋的钢筋混凝土支撑与装配式双 H 型钢

支撑承载力近似相等。

根据 2021 年 11 月武汉市钢材和混凝土市场价格可计算出装配式双 H 型钢支撑综合单价约 5 000 元/m,装配式双 H 型钢支撑可重复使用,但在工地间转运使用时会产生一定的运输和安装费用,综合考虑实际工程量和装配式双 H 型钢支撑的质量后,可以计算出装配式双 H 型支撑使用一次产生 800 元/m 的运输安装费用。钢筋混凝土支撑综合单价约 2 500 元/m。若支撑使用  $n$  次,则装配式双 H 型钢支撑和钢筋混凝土支撑的经济成本分别为  $5\,000 + 800n$  (元/m) 和  $2\,500n$  (元/m)。经济成本节约量如图 10 所示。装配式双 H 型钢支撑与钢筋混凝土

支撑的经济成本比为  $(5\ 000 + 800(n + 1)) / (2\ 500(n + 1))$ 。

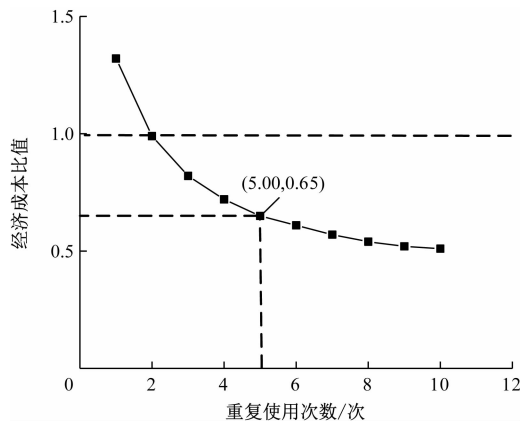


图 10 双 H 型钢支撑与钢筋混凝土支撑的经济成本比

Fig. 10 Economic cost ratio of double H-shaped steel struts to reinforced concrete struts

目前关于混凝土结构及钢结构碳排放计算多采用基于 LCA(生命周期)统计方法和基于 I-O(投入产出)统计方法,其中基于投入产出的统计方法计算简便,计算方法直观,而基于生命周期的统计方法统计数据更为全面,包含了开采、运输等过程的碳排放,结果相对真实,因此本次碳排放计算采用基于生命周期的统计方法。

根据文献[8]的研究成果可知,每吨混凝土碳排放量为 0.14 t;根据文献[9]的研究成果可知,每吨钢材碳排放量为 2.11 t;根据文献[10]的研究成果可知,每吨钢筋的碳排放量为 1.87 t。如果支撑使用  $n$  次,可以计算出装配式双 H 型钢支撑和钢筋混凝土支撑的碳排放量分别为  $1.14$  (t/m) 和  $0.59n$  (t/m),装配式双 H 型钢支撑与钢筋混凝土支撑的碳排放量比例关系为  $1.14 / (0.59(n + 1))$ ,绘制成曲线如图 11 所示。

因此,在重复使用 5 次的条件下,装配式双 H 型钢支撑与钢筋混凝土支撑相比,可节约 35% 的经济成本,同时可以减少 68% 的碳排放量。

## 5 结语

提出了一种适用于地铁车站工程的装配式双 H 型钢支撑,进行了支撑截面和节点设计,并将此种装配式双 H 型钢支撑应用于地下车站深基坑工程中。

采用 ABAQUS 软件分别建立了装配式双 H 型钢支撑和支撑拼接节点的有限元模型,并开展了支

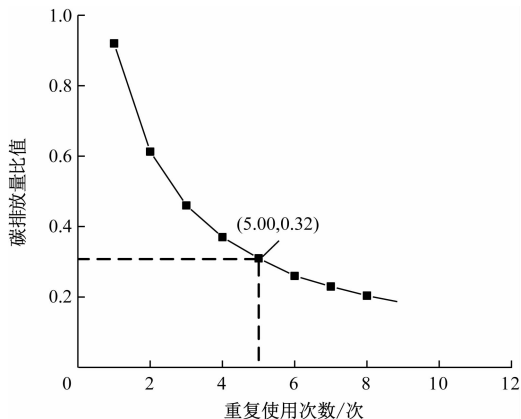


图 11 双 H 型钢支撑相比钢筋混凝土支撑的碳排放量比

Fig. 11 Carbon emission ratio of double H-shaped steel struts to reinforced concrete struts

撑轴压和节点受弯数值模拟。结果表明:在轴压作用下,双 H 型钢支撑绕实轴和虚轴的稳定承载力分别为规范计算承载力的 1.62 倍和 1.58 倍;在弯矩作用下,双 H 型钢支撑拼接节点屈服弯矩和极限弯矩分别是双 H 型钢支撑弯矩设计值的 1.58 倍和 1.93 倍。

在重复使用 5 次的条件下,装配式双 H 型钢支撑钢筋与混凝土支撑相比,可节约 35% 的经济成本,同时可以减少 68% 的碳排放量。

## 参考文献

- [1] JIA L J, TIAN Y F. Rotational capacity of H-shaped steel beams under cyclic pure bending [J]. Steel and Composite Structures, 2019, 30(2): 123.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of steel structure: GB 50017—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 热轧 H 型钢和剖分 T 型钢: GB/T 11263—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.  
General Administration of Quality Supervision of the people's Republic of China, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Hot rolled H and cut T section steel: GB/T 11263—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [4] 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, 2011.

(下转第 88 页)

- ameter tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 42: 59.
- [7] 王超东, 赖鹏安, 曹洋, 等. 滨海软土地层盾构近接穿越角度对既有隧道影响的模型试验研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(1): 168.
- WANG Chaodong, LAI Peng'an, CAO Yang, et al. Model test study on the influence of the close crossing angles of overlapped shield tunnels on existing tunnels in coastal soft soils[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(1): 168.
- [8] 贺美德, 刘军, 乐贵平, 等. 大断面通道近距离上穿盾构隧道引起的变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊2): 3682.
- HE Meide, LIU Jun, LE Guiping, et al. Deformation analysis for shield tunnel upper crossing by close range large section passage-way[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S2): 3682.
- [9] 姜叶翔, 周奇辉, 羊逸君, 等. 采用管棚预支护方法的盾构穿越既有地铁隧道变形特征及加固影响实测分析[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2021, 3(2): 49.
- JIANG Yexiang, ZHOU Qihui, YANG Yijun, et al. Reinforcement effect and actual measurement analysis of new shield tunnel crossing existing metro tunnel with shed pre-supporting method[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2021, 3(2): 49.
- [10] 张明书, 龚伦, 陈海勇, 等. 地铁 TBM 区间上跨高铁隧道施工关键技术研究[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(7): 76.
- ZHANG Mingshu, GONG Lun, CHEN Haiyong, et al. Research on the key technologies of construction of TBM interval tunnel across high-speed railway tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(7): 76.
- [11] 杨志勇, 杨星, 江玉生, 等. 盾构近距离上跨既有运营隧道施工控制技术[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(11): 1898.
- YANG Zhiyong, YANG Xing, JIANG Yusheng, et al. Construction control technology of shield overcrossing adjacent existing operation tunnel[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(11): 1898.
- [12] 路国樑, 刘斌, 杨磊, 等. 盾构近距离上穿既有地铁隧道施工技术与控制措施[J]. 土工基础, 2018, 32(6): 590.
- LU Guoliang, LIU Bin, YANG Lei, et al. Construction control methods of a shielded tunnel over crossing an existing operating metro tunnel[J]. Soil Engineering and Foundation, 2018, 32(6): 590.
- [13] 李建设, 陈慧超, 李政. 深圳地铁 11 号线车公庙站—红树湾站区间盾构隧道小净距上穿既有有线区间隧道施工关键技术[J]. 隧道建设, 2014, 34(4): 374.
- LI Jianshe, CHEN Huichao, LI Zheng. Key construction technologies for shield-bored tunnel of Chegongmiao Station-Hongshuwan Station section on No. 11 Line of Shenzhen Metro crossing closely above existing metro line[J]. Tunnel Construction, 2014, 34(4): 374.

(收稿日期:2022-09-08)

## (上接第 79 页)

- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures; GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [5] CHUNG K F, IP K H. Finite element modeling of bolted connections between cold-formed steel strips and hot rolled steel plates under static shear loading[J]. Engineering Structures, 2000, 22(10): 1271.
- [6] WANG Y Q, WU J K, LIU H B, et al. Modeling and numerical analysis of multi-bolt elastic interaction with bolt stress relaxation[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C; Journal of Mechanical Engineering Science, 2016, 230(15): 2579.
- [7] 王萌, 石永久, 王元清. 高强度螺栓连接抗剪性能研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(3): 27.
- WANG Meng, SHI Yongjiu, WANG Yuanqing. Analysis on shear behavior of high-strength bolts connection[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(3): 27.
- [8] 俞海勇, 王琼, 张贺, 等. 基于全寿命周期的预拌混凝土碳排放计算模型研究[J]. 粉煤灰, 2011, 23(6): 42.
- YU Haiyong, WANG Qiong, ZHANG He, et al. Service life period-based carbon emission computing model for ready-mix concrete[J]. Coal Ash China, 2011, 23(6): 42.
- [9] 刘宏强, 付建勋, 刘思雨, 等. 钢铁生产过程二氧化碳排放计算方法与实践[J]. 钢铁, 2016, 51(4): 74.
- LIU Hongqiang, FU Jianxun, LIU Siyu, et al. Calculation methods and application of carbon dioxide emission during steel-making process[J]. Iron & Steel, 2016, 51(4): 74.
- [10] 董坤涛. 基于钢筋混凝土结构的建筑物二氧化碳排放研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2011.
- DONG Kuntao. Study on carbon dioxide emission of buildings based on reinforced concrete structure[D]. Qingdao: Qingdao Technology University, 2011.

(收稿日期:2022-05-25)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821