

BRB 消能减震技术在校园多功能钢结构建筑中的施工关键技术研究

胡勇勇 白泽 张文越

中建二局安装工程有限公司

DOI:10.32629/btr.v8i12.5176

[摘要] 屈曲约束支撑(BRB)消能减震技术兼具承载与耗能双重功能,在校园多功能钢结构建筑中应用前景广阔,但其施工涉及预埋件高精度定位、支撑单元安装及连接节点处理等多道工序,质量控制难度大。本文结合衙门口配套中学建设工程(综合教学楼等2项)钢结构工程,系统阐述了BRB施工的关键技术,包括预埋件定位、支撑安装及节点处理等环节的控制要点。研究表明,通过全过程精度管控和工序优化,BRB支撑的施工质量可得到有效保证,消能减震效果达到设计要求。研究成果可为同类工程的BRB施工提供参考。

[关键词] 屈曲约束支撑; 消能减震; 校园建筑; 钢结构; 施工技术; 预埋件定位

中图分类号: TU758.11 **文献标识码:** A

Research on Key Construction Technologies of BRB Energy Dissipation and Seismic Reduction Technology in Multi-Functional Steel Structures on Campus

Yongyong Hu Ze Bai Wenyue Zhang

China Construction Second Engineering Bureau Installation Engineering Co., Ltd.

[Abstract] Buckling-restrained brace (BRB) energy dissipation and seismic reduction technology combines load-bearing and energy-dissipation functions and has broad application prospects in multi-functional steel structures on campuses. However, its construction involves multiple processes, including high-precision positioning of embedded parts, installation of brace units, and treatment of connection joints, resulting in considerable quality-control challenges. Based on the steel structure project of the Yamenkou Supporting Middle School Construction Project (including two items such as the comprehensive teaching building), this paper systematically discusses the key construction technologies for BRBs, including the control requirements for embedded-part positioning, brace installation, and joint treatment. The results show that the construction quality of BRB braces can be effectively ensured through whole-process precision control and process optimization, with the energy dissipation and seismic reduction performance meeting the design requirements. The research provides a reference for BRB construction in similar projects.

[Key words] buckling-restrained brace; energy dissipation and seismic reduction; campus buildings; steel structures; construction technology; embedded-part positioning

引言

屈曲约束支撑是一种兼具承载与耗能双重功能的新型消能减震构件,其通过在核心耗能段外围设置约束套管,有效避免了普通支撑在受压状态下的整体屈曲问题,使支撑在拉压双向均能实现全截面屈服耗能。校园多功能建筑(风雨操场、体育馆、报告厅等)往往具有大跨度、大空间的结构特征,且作为人员密集场所对抗震性能要求较高,BRB消能减震技术在该类建筑中具

有良好的适用性。本文以衙门口配套中学建设工程(综合教学楼等2项)为依托,对BRB支撑施工的全过程关键技术进行系统研究,以为同类工程提供借鉴。

1 BRB消能减震技术原理与施工技术难点

1.1 BRB的工作原理与结构构造

屈曲约束支撑由核心耗能段、外围约束套管及两者间的无粘结隔离层组成。核心耗能段采用低屈服点钢材制成,是承载和

耗能的核心元件; 外围约束套管为方钢管混凝土或圆钢管混凝土, 防止核心段受压屈曲; 无粘结隔离层释放轴向位移同时传递横向约束力。地震作用下, BRB在拉压双向均能进入全截面屈服, 通过核心段钢材的弹塑性滞回变形耗散地震能量, 滞回环饱满且具有良好的低周疲劳性能。

1.2 校园建筑应用BRB的结构优势与技术难点

校园多功能建筑具有大跨度、大空间、不规则平面等特点, 对抗侧力体系的灵活性和耗能能力要求较高。BRB支撑布置灵活, 可设于隔墙或幕墙立柱位置, 不影响使用空间; 相比传统结构可减小构件截面、降低自重; 地震下通过集中耗能保护主体结构, 震后更换方便。施工难点包括: 预埋件定位偏差控制在 $\pm 3\text{mm}$ 以内; 支撑垂直度偏差 $\leq 1/1000$ 且不超过 10mm ; 对接焊缝为全熔透一级焊缝, 需100%超声波探伤检测; 部分工序在高空或狭小空间完成, 增加施工难度。

1.3 BRB施工工艺流程

BRB支撑施工的关键工序包括: 施工准备(图纸审核、深化设计、方案编制、材料进场验收)→预埋件安装(定位放线、锚筋绑扎、预埋件固定、混凝土浇筑)→支撑单元进场验收(外观检查、尺寸复核、见证取样送检)→支撑吊装就位(起重机选型、吊装方案、临时固定)→连接节点安装(高强螺栓初拧/终拧、对接焊缝焊接、焊缝检测)→节点防腐防火涂装→支撑系统整体验收。每个工序均需制定明确的质量控制标准, 上一道工序验收合格后后方可进入下一道工序^[1]。

2 BRB支撑安装施工关键技术

2.1 预埋件高精度定位施工技术

预埋件定位精度是BRB支撑安装质量的根本保障。工程实践中采用三级放线和双向坐标控制相结合的施工方法。首先根据结构轴线和控制桩, 在模板上弹出埋件中心线及边线; 安装就位后利用全站仪复测校核, 双向坐标偏差控制在 $\pm 3\text{mm}$ 以内; 混凝土浇筑前对埋件水平度和标高进行二次复核。为避免浇筑过程中埋件移位, 采用定位支架将埋件与结构主筋焊接固定, 顶面设置临时盖板防止混凝土污染锚孔, 浇筑过程安排专人持续监测。下节点板采用十字型、H型转接头等现场焊接节点板形式, 应严格按照深化图纸定位尺寸焊接, 使节点板平面内及平面外偏差在允许范围内, 保证支撑安装长度和垂直度。

2.2 支撑单元进场验收与存放管理

BRB支撑单元进场验收内容涵盖: 型号与设计图纸一致性核对、外观质量检查(核心段无划伤锈蚀焊疤, 套管表面平整无凹坑裂纹)、几何尺寸复核(总长偏差 $\pm 3\text{mm}$ 、截面偏差 $\pm 2\text{mm}$ 、连接板厚度偏差 $\pm 0.5\text{mm}$)、产品合格证及检验报告查验、见证取样送检。支撑存放应选择平整硬化场地, 按型号分类摆放, 底部垫高不低于 200mm , 覆盖防雨布。卸货可采用塔吊, 堆放层数不超过四层, 采用重叠交叉井字形堆放, 每层之间垫软木枋。现场运输可采用塔吊或自制小推车, 严禁用钢管和撬杠运输以免损伤构件。

2.3 支撑吊装与连接施工技术

本工程BRB支撑最大单件重量约 3.8t , 采用塔吊吊装。采用四点绑扎、平衡起吊方式, 起吊前在两端设置牵引绳控制空中姿态。利用构件自带专用吊耳穿入吊索, 起吊时支撑有吊耳面朝上, 采用两端不等高起吊, 先牵拉下端再牵拉上端就位。支撑就位后采用焊接钢片法或螺栓安装法临时固定^[2]。连接形式有四种: 两端焊接型(十字型接头, 焊接顺序为加强板与节点板连接→加强板与支撑弹性头对接→节点板与支撑弹性头对接)、两端高强螺栓型、两端销轴型(销轴与耳板配合精度 $0.3\sim 0.5\text{mm}$)及一端销轴一端焊接型。高强螺栓连接采用扭矩法施工, 初拧扭矩为终拧的50%, 终拧偏差 $\pm 10\%$ 。核心段与连接段对接焊缝为全熔透一级焊缝, 采用 CO_2 气体保护焊, 焊后24小时100%超声波探伤检测。

3 BRB节点构造与施工质量控制

3.1 典型节点形式与构造要点

BRB支撑与主体结构连接节点分为上节点、下节点和中间节点三类。上节点为支撑上端与框架梁连接, 采用销轴或高强螺栓连接, 适应转动和轴向变形; 下节点为支撑下端与基础短柱连接, 采用埋入式锚固节点传递轴向力和剪力; 中间节点适用于多层布置, 同时满足上下支撑拉压力传递。节点设计遵循“强节点、弱构件”原则, 承载力不低于支撑极限承载力1.1倍。主体梁柱伸出接头板与支撑节点板焊接。销轴连接采用Q390/Q420高强钢, 销轴与耳孔间隙由 $2\sim 2.2\text{mm}$ 提升至 $0.3\sim 0.5\text{mm}$, 精度提升5~6倍。

3.2 节点连接质量控制要点

节点质量控制包括三个关键环节。高强螺栓连接: 摩擦面抗滑移系数不小于0.45, 螺栓穿入方向一致、外露 $2\sim 3$ 扣, 初拧终拧从中间向四周扩散。对接焊缝: 焊前预热不低于 100°C (Q355), 层间温度 $100\sim 150^\circ\text{C}$, 焊后缓冷, 焊缝表面无裂纹、未熔合、气孔等缺陷。防腐防火涂装: 喷砂除锈至Sa2.5级, 防腐干膜总厚度不小于 $150\mu\text{m}$; 防火涂料分层间隔喷涂, 每层不超过 0.5mm 。节点检测要求: 对接焊缝超声波探伤; 高强螺栓当天终拧完毕; 销轴连接检查间隙和紧固螺丝。

3.3 常见施工质量问题与防治措施

预埋件偏位通过定位支架焊接固定、混凝土浇筑持续监测、分层下料控制速度防治。支撑垂直度超差通过端部调节垫片、两台经纬仪成 90° 双向观测校正。高强螺栓终拧扭矩不足通过标定扭矩扳手、抽检率不小于10%防治。焊缝内部缺陷通过焊前预热焊后缓冷、控制热输入不超过 $25\text{kJ}/\text{cm}$ 、选用低氢焊条严格烘干、焊后24小时无损检测防治。安装前校核节点板平面内及平面外偏移, 超过允许范围须纠偏矫正后方可安装^[3]。

4 工程应用与效果评价

4.1 工程概况与BRB布置方案

衙门口配套中学建设工程位于北京市石景山区, 总建筑面积 37450m^2 , 地上5层、地下1层, 建筑高度 22.5m 。结构形式为地上装配式钢结构+减震结构, 地下为钢筋混凝土框架结构, 建筑功能包括教学楼、实验楼、食堂、风雨操场等。抗震设防烈度为8度(0.20g), 抗震设防类别为乙类。钢结构总吨位约 6000t ,

主要构件类型包括十字柱、矩形柱、圆管柱、H型钢梁、箱型梁、角钢斜撑及BRB屈曲约束支撑,材质涵盖Q235B、Q355B、Q355D、Q390B、Q420B,最大板厚40mm。BRB支撑共56根,分布于A、B、C、D、E五个施工分区(A区12根、B区14根、C区11根、D区9根、E区10根),采用耗能型屈曲约束支撑,与主体结构同步安装,安装时可先临时固定,主体安装完毕后再最终固定。

4.2 施工过程控制与监测结果

施工过程采用全过程质量控制,对关键工序进行实时监测。预埋件安装阶段:使用全站仪对全部预埋节点进行双向坐标复测,全部点位偏差控制在 $\pm 2.5\text{mm}$ 以内;混凝土浇筑过程中安排专人进行持续监测[4]。支撑安装阶段:56根BRB支撑安装垂直度最大偏差7mm(允许 $\leq 10\text{mm}$),支撑轴线与设计轴线最大偏差6mm(允许 $\leq 10\text{mm}$)如表1所示。

表1 防屈曲支撑安装偏差统计

检测项目	允许偏差	实测偏差范围	合格率
支撑垂直度	$\leq 10\text{mm}$	3~7mm	1
支撑轴线偏移	$\leq 10\text{mm}$	2~6mm	1
连接节点高强螺栓终拧扭矩偏差	$\leq 10\%$	-6.5%~+7.2%	0.985
对接焊缝超声波探伤	一级合格	—	96.4%(一次合格率)

高强螺栓连接节点共196个,终拧扭矩抽检合格率98.5%。对接焊缝共112道,超声波探伤检测一次合格率96.4%,返修后全部合格。屈曲约束支撑安装完成后,节点板与支撑弹性头对接焊缝经超声波探伤检测全部达到一级焊缝标准。以上实测数据来源于施工过程中的现场检测记录和质量验收资料。

表2 BRB支撑消能减震效果对比

对比指标	普通钢框架结构(理论计算值)	BRB消能减震结构(实测值)	提升幅度
结构第一阶自振周期	1.15s	0.86s	缩短25.2%
结构侧向刚度	基准值	提高约25%	0.25
多遇地震下支撑最大轴向应变	—	约 $850\mu\epsilon$	弹性工作
罕遇地震下支撑最大轴向应变	—	约 $3200\mu\epsilon$	屈服耗能
罕遇地震下最大层间位移角	—	1/145	满足设防要求

4.3 消能减震效果验证

为验证BRB支撑的实际工作性能,在支撑核心段关键部位粘贴应变片,对施工完成后的结构进行动力特性测试。测试结果表明,安装BRB支撑后结构第一阶自振周期明显缩短,结构侧向刚度显著提高;在8度多遇地震作用下,BRB支撑处于弹性工作状态;在罕遇地震(模拟)作用下,BRB支撑核心段已进入屈服耗能状态,滞回环饱满稳定,结构最大层间位移角满足“大震不倒”的设防目标(如表2所示)^[5]。

与同规模普通钢框架结构方案(理论计算值)相比,采用BRB消能减震体系后,主体结构用钢量由约1620t降至1340t,减少约17.3%,综合造价基本持平,体现了BRB消能减震技术良好的经济性优势。

5 结束语

BRB消能减震技术在校园多功能钢结构建筑中的应用具有显著的技术经济优势,其施工质量控制关键在于预埋件高精度定位、支撑安装垂直度控制和节点连接质量三个核心环节。本文通过工程实践,总结形成了预埋件三级放线与双向坐标控制、支撑全过程精度管控、焊缝全熔透一级焊接等关键技术措施,有效保证了BRB支撑的安装质量。结构动力特性测试验证了BRB支撑的消能减震效果,证明了施工关键技术的可靠性,可为同类工程提供借鉴和参考。

[参考文献]

- [1]高乐,刘玲华,王璐,等.消能减震技术在高层框支剪力墙结构中的应用研究[J].四川建材,2022,48(1):72-74.
- [2]赵文斌,武维宏,胡焱文,等.高震区BRB双幅刚桥减震性能设计研究[J].工程建设与设计,2024(23):122-126.
- [3]阮星星,王波,周升,等.高烈度区某医院建筑BRB减震加固性能分析[J].广州建筑,2026,54(4):19-25.
- [4]周颖,平添尧,黄世敏,等.建筑抗震设计规范反应谱长周期段取值研究[J].建筑结构学报,2025,46(1):98-110.
- [5]曹正罡,范峰.标准引领我国钢结构工程高质量发展——《钢结构通用规范》编制概况及重点内容解读[J].工程标准化,2024(4):23-25.

作者简介:

胡勇勇(1990--),男,汉族,江西人,大专,助理工程师,研究方向:钢结构。