

多层公共建筑组合式消能减震构件现场施工应用

郭少华 齐岩 杨广鹤

中信建设有限责任公司, 北京 100027

[摘要]高抗震设防烈度地区的多层钢框架公共建筑, 普遍存在侧向抗变形能力偏弱、吸能缓冲方式单一的工程短板, 文章以此为切入点, 开展屈曲约束支撑 (BRB) 与黏滞流体阻尼器 (VFD) 配套消能减震协同施工成套技术研究。BRB 主要用来给建筑补上侧向抵抗刚度, VFD 依靠构件运动速度耗散地震能量, 两类减震装置作用互补、各司其职。文章完整拆解构件预埋、现场吊装、节点拼接对接、精度调平、预应力复核校验整套施工工序, 重点解决现场焊接变形、构件对中偏差、安装对位错位三大施工麻烦。搭建多工种交叉施工时间管控体系, 理顺各工序穿插施工先后逻辑。现场实测 BRB、VFD 检测结果全部达标, 以供参考。

[关键词]组合式消能减震; 屈曲约束支撑; 黏滞阻尼器; 钢框架结构; 同轴度控制

DOI: 10.33142/ect.v4i6.19937

中图分类号: TU352.1

文献标识码: A

On-site Construction Application of Composite Energy Dissipation and Shock Absorption Components in Multi Story Public Buildings

GUO Shaohua, QI Yan, YANG Guanghe

CITIC Construction Co., Ltd., Beijing, 100027, China

Abstract: Multi story steel frame public buildings in areas with high seismic fortification intensity generally suffer from weak lateral deformation resistance and single energy absorption and buffering methods. Taking this as the starting point, this article conducts a complete set of technical research on the coordinated construction of buckling restrained braces (BRB) and viscous fluid dampers (VFD) for energy dissipation and seismic reduction. BRB is mainly used to supplement the lateral resistance stiffness of buildings, while VFD relies on the velocity of component movement to dissipate seismic energy. The two types of shock absorption devices complement each other and perform their respective functions. The article fully disassembles the entire construction process of component pre-embedding, on-site hoisting, node splicing and docking, precision leveling, and pre-stress verification, focusing on solving the three major construction problems of on-site welding deformation, component alignment deviation, and installation misalignment. Establish a cross disciplinary construction time control system for multiple types of work, and streamline the logical sequence of construction for each process. The on-site test results of BRB and VFD all meet the standards for reference.

Keywords: combination energy dissipation and shock absorption; buckling restrained support; viscous damper; steel frame structure; coaxiality control

引言

常规多层钢框架中心支撑体系存在明显短板, 遭遇小震作用时支撑构件极易发生弹性屈曲变形, 进入中震工况后会产生不可恢复的塑性破坏, 同时该体系仅依靠支撑形成塑性铰消耗地震能量, 整体减震效果偏弱^[1]。目前消能减震装置分为两类, 一类随变形耗能、一类随震动速度耗能。屈曲约束支撑 (BRB) 归为变形控制类, 依靠内部芯板进入塑性阶段耗散地震能量, 还能为结构补足侧向抵抗刚度; 黏滞流体阻尼器 (VFD) 属于速度控制类, 借助内

部黏滞介质摩擦吸能, 不会改动建筑原有初始刚度, 重点降低楼层震动加速度^[2]。只单独用其中一种减震构件, 没法同时兼顾结构抗侧刚度、全震级耗能需求; 把 BRB 和 VFD 搭配组合使用, 就能达成分层抗震效果: 小地震靠充足刚度稳住楼房变形、中等地震两种构件同步分担耗散震动能量、强地震依靠耗能构件充当“安全保险丝”, 确保主体钢框架结构的稳定性。

1 工程概况

北京理工大学良乡校区前沿交叉科学研究院 B 楼,

总建筑面积 54895m²，地上 9 层，檐口高度 43.2m，为 8 度抗震设防科研办公复合型建筑。项目创新采用钢框架+中心支撑+BRB 屈曲约束支撑+VFD 黏滞阻尼器四级抗侧力体系，共计布设 102 套 VFD 黏滞阻尼器、72 套 BRB 屈曲约束支撑，核心目标是保障强震安全，同时实现震后快速修复。

黏滞阻尼器（VFD-NL×1000）为单出杆款式，内部填充低温抗老化硅基阻尼油，可耐受-15℃低温环境。地震发生时，活塞杆和缸筒互相推拉，高压阻尼油穿过细小孔隙流动，把地震晃动的动能转化为热量消散，构件全程不会发生永久弯曲、变形，地震结束后自动回弹归位，无需人工复位。参数指标：设计阻尼承载力 1000kN，伸缩行程±60mm，阻尼指数 0.35，设计使用寿命 50 年；端部配套球铰可实现±3°转角，能够适配楼层地震时的扭转偏移，避免阻尼器卡滞损坏。

屈曲约束支撑（BRB）为全钢外套管式，分为两类规格：BRB-C20006.2 共 16 套、BRB-C15005.5 共 56 套。构件为三层复合构造：内层 Q235B 低屈服钢芯材、中间 2mm 聚乙烯无粘结隔离层、外层 Q355B 约束套管。聚乙烯隔离层隔绝芯材与套管摩擦，确保芯材单独承受拉压作用力。性能参数：前者屈服力 2000kN、极限位移 45mm；后者屈服力 1500kN、极限位移 42mm，两款构件屈服后刚度比统一为 0.035。

两类耗能构件受力分工明确：小震工况下，BRB 保持弹性不变形，单纯辅助钢框架提升建筑抗晃动刚度；中、大震工况下，BRB 钢芯率先受力屈服消耗地震能量，外层套管限制芯材侧向弯曲。工程逻辑上 BRB 属于可更换“结构保险丝”，主动承接全部地震损伤，把破坏集中在低成本、可拆卸的支撑构件上，保护钢框架主体始终处于弹性状态，震后仅更换损坏 BRB 即可，无需修缮主楼主体。

2 阻尼器施工概况与平面分布

依托有限元计算得出的结构受力数据，本项目依据各楼层剪力数值、层间变形情况分层布设减震装置：首层整体剪力数值最高，配置 12 套人字形对称 BRB 屈曲约束支撑、24 套单跨斜向 VFD 粘滞阻尼器；二层布置 16 套 BRB、22 套 VFD；3 至 9 层楼层剪力逐步减小，仅在建筑四角位置集中设置 BRB，总量 44 套，平均每层约 6.29 套，其余区域大面积安装 VFD 阻尼器，兼顾室内采光和使用空间。地下楼层不额外增设减震构件，依靠剪力墙承担抗震受力。所有减震支撑、阻尼构件均采用工厂预制加工，现

场不允许裁切修改，构件进场前要通过第三方静力性能检测，合格后方可运至施工现场。现场施工存在三项工序同步穿插作业，分别是钢结构焊接、桁架楼承板铺装、减震构件吊装，再叠加北京地区扬尘管控要求，且风力达到 6 级及以上时不得开展吊装作业，工期进度受天气限制明显，需要细化施工计划、精准安排各道工序。

3 组合式消能减震体系协同减震机理

3.1 构件功能互补机理

单一 BRB 仅能在位移超过屈服位移后耗能，小震下无耗能能力，仅提供刚度，易放大结构地震加速度；单一 VFD 无法补充结构抗侧刚度，对于层间位移超限的薄弱楼层控制效果极差。二者组合后形成互补体系：在多遇小震下，结构层间位移小于 BRB 屈服位移，BRB 弹性工作提升结构抗侧刚度，抑制层间位移，VFD 依靠楼层微小振动速度同步耗散残余地震能量，降低梁柱节点动应力；在设防中震下，底层 BRB 率先屈服耗能，上部楼层 VFD 主导耗能，分散楼层损伤；在罕遇大震下，全楼层 BRB 进入塑性耗能，VFD 达到最大行程极限耗能，双重保护主体钢框架，实现震后主体结构无需修复、仅更换减震构件即可恢复使用功能。

3.2 结构附加阻尼比计算

依据 JGJ 297-2013 累积能量比值法计算组合体系附加阻尼比，结构自身固有阻尼比取 0.02。经 PKPM-SAU-SAGE 时程分析，在七条天然地震波作用下，组合减震体系平均附加阻尼比 0.082，其中 VFD 贡献附加阻尼比 0.057，BRB 贡献附加阻尼比 0.025。相较于单一 BRB 体系（附加阻尼比 0.041）、单一 VFD 体系（附加阻尼比 0.063），组合体系阻尼匹配更合理，有效规避了单一阻尼器耗能饱和问题。

4 组合减震构件现场施工重难点分析

钢柱、钢梁连接用预埋钢板对位误差不能超过 3mm，焊接后钢材收缩常会迫使构件硬拼对接，进而产生额外结构应力；VFD 设备同轴度误差控制标准为不大于 2mm，钢梁受力下会出现下挠变形，很容易造成轴系偏心，引发密封部位渗油漏油；多工种交叉施工阶段，防火涂料容易弄脏阻尼介质，楼承板还会盖住吊装作业区域，各道工序施工顺序相互干扰、冲突频发；BRB 消能支撑采用低屈服钢芯，自身刚度偏弱，吊装、堆放过程中极易发生无法校正的塑性弯折，一旦出现这类变形只能运回工厂重做。以上四类难题同时存在，大幅提升了构件精度管控、施工工序统筹以及成品防护的施工标准。

5 组合式消能减震构件现场施工工艺

5.1 构件进场复验与存储管控

所有减震构件进场需核出厂静力试验报告、第三方阻尼系数检测报告,重点核验 BRB 芯材屈服力、VFD 阻尼系数、极限位移三大指标。外观检查要求:VFD 活塞杆表面无划痕、镀层完好,划痕深度超过 0.05mm 直接退场;BRB 约束套管无变形、无锈蚀,端部连接耳板孔位误差 $\leq 1.5\text{mm}$ 。现场存储分区隔离:VFD 室内架空存放,底部垫 150mm 方木,竖直摆放,避免活塞杆长期水平受力弯曲;BRB 室外防雨覆盖存放,堆放层数不超过 3 层,层间设置柔性橡胶垫层,防止套管磕碰变形。北京春季多风沙,所有构件端部封堵防尘盖板,防止沙尘进入阻尼器内部与 BRB 无粘结层。

5.2 BRB 屈曲约束支撑现场施工工艺

现场测量放线采用 Faro Focus S350 三维激光扫描仪作业,替换传统全站仪设备,构件对位偏差可从原有 5~8mm 控制在 2mm 以内;若耳板节点尺寸偏差超出允许范围,仅允许进行扩孔微调处理,扩孔尺寸不得大于原孔径的 10%,全程禁止使用火焰切割开孔^[3]。

构件吊装选用 QTZ80 型塔吊,吊点设置在构件重心位置,统一使用柔性吊带起吊,不允许钢丝绳直接捆绑套管构件;构件吊装就位后先穿临时螺栓临时固定,竖向预留 2mm 调节空隙,静置 12h 释放内部残余应力,再完成高强螺栓终拧作业。

构件连接形式为两端销轴搭配侧面环绕焊接,销轴材质选用 42CrMo 合金钢,防腐等级达到 C5 标准;环向焊缝执行二级焊缝标准,全部焊缝做 100%超声波无损探伤检测。焊接采用分段退步焊工艺,单次施焊长度不超过 150mm,严控焊接热量输入,避免耳板受热变形,防止 BRB 支撑出现初始预应力偏差。

5.3 VFD 黏滞阻尼器现场施工工艺

对端部球铰接副开展清污作业,彻底剔除石墨润滑脂夹层内焊渣、熔融飞溅等异物,保障铰接副回转自由度无阻滞;若清洁管控缺失,地震工况下将衍生附加弯矩荷载,诱发活塞杆脆性断裂失效^[4]。斜向布设工况易产生装配偏心缺陷,配套双百分表同轴度检测专用工装,于缸筒外壁、活塞杆端头分设测点架设量表,通过千斤顶微量校正调平,双表径向同轴偏差均控制 $\leq 2\text{mm}$,调校完成后紧固定位锚栓,严禁二次撬动扰动装配精度;装配就位后校核构件初始有效行程并统一复位归零,规避后期楼板不均匀沉降引发构件预压缩损伤;跨高低差楼板布置的 VFD

增设柔性限位拉杆附属构件,约束施工堆荷载下超量行程位移,防止密封组件挤压破损渗漏。

5.4 组合构件交叉穿插施工时序优化

原有并行施工方案存在楼承板栓钉焊接火花灼伤 VFD 活塞杆镀层的问题,优化后采用流水化穿插时序:第一层钢梁柱安装 $\rightarrow$ BRB 永久固定 $\rightarrow$ VFD 粗调定位(不终拧) $\rightarrow$ 钢筋桁架楼承板铺设、栓钉焊接 $\rightarrow$ 楼承板混凝土浇筑养护 7d $\rightarrow$ VFD 同轴度二次复测、终拧固定 $\rightarrow$ 防火涂料局部喷涂。该时序利用混凝土养护窗口期消除钢梁长期蠕变挠度,解决后期阻尼器偏心问题,同时隔离焊接动火与减震构件作业面。

6 施工质量控制与缺陷处理

6.1 关键质量验收指标

制定项目专项验收指标,具体限值及检测要求如下:

(1) 减震产品预埋件预埋精度:预埋件中心标高允许偏差 $\pm 2\text{mm}$,平面位置允许偏差 $\pm 2\text{mm}$,预埋件顶面水平度允许偏差 $\pm 3\%$;采用水准仪校核标高、全站仪校核平面坐标、靠尺配合塞尺检测水平度,水平度超限会直接导致后期阻尼器初始偏心。(2) 连接节点板安装精度:节点板轴线偏移 $\pm 2\text{mm}$,节点板垂直度允许偏差 3mm;上下成对布置的节点板平面相对偏移 $\pm 2\text{mm}$,该指标为控制 BRB、VFD 同轴度的前置指标,上下偏移超标会造成构件强制对接产生附加内应力。(3) VFD 黏滞阻尼器成品安装精度:阻尼器端部安装净空偏差控制在 $+3\text{mm}\sim+8\text{mm}$,杜绝负偏差导致构件挤压受力;阻尼器整体弯曲矢高 $\leq L/1000$ (L 为阻尼器有效安装长度),且最大值不得超过 10mm,主要管控斜向安装后活塞杆挠曲变形。(4) 原有通用指标:BRB 轴线对位偏差 $\leq 3\text{mm}$,端部间隙偏差 $\pm 1\text{mm}$;所有连接高强螺栓终拧扭矩偏差 $\pm 5\%$;构件防腐涂层破损面积不得大于 0.5%。

6.2 典型现场缺陷及处理措施

BRB 耳板焊接变形、上下节点板偏移:现场 3 套 BRB 配套上下节点板平面相对偏移 4.1mm,超出 $\pm 2\text{mm}$ 限值,同时伴随耳板受热内凹,销轴穿入困难。诱因是钢柱焊接后未静置直接复测放线,焊接残余应力导致节点板位移。处理措施:采用低温火焰局部回火矫正,回火温度控制在 280°C 以内,避免损伤芯材力学性能,矫正后复核节点板垂直度、平面偏移,全部达标后重新开展超声波 UT 探伤。

VFD 弯曲矢高超标、同轴度偏差:2 套斜向 VFD 弯曲矢高 12mm,超出 $\leq 10\text{mm}$ 限值,同时活塞杆端部微量漏油,经排查为钢梁下挠导致阻尼器受弯、密封环挤压损

伤。诱因是阻尼器安装净空预留不足（仅+2mm），不满足+3mm 下限要求。处理措施：通过端部偏心销轴微调安装净空至+5mm，校正弯曲矢高至 7.8mm，密封组件返厂更换，现场严禁拆解阻尼缸筒。

预埋件水平度超标：4 处 VFD 预埋件水平度 4.2%，超出±3%限值，造成球铰支座转动卡顿。处理措施：采用不锈钢薄垫片单侧找平，垫片层数不超过 2 层，找平后重新检测预埋件中心标高、平面位置，确保其余指标同步合规。

7 施工完成后结构抗震性能实试验证

项目主体结构完工后，采用环境脉动测试法做现场动力实测，实测数据证明这套组合减震体系能有效提升建筑抵抗侧向晃动的刚度，现场测出的阻尼比值和前期计算数值相差不大，构件耗能减震能力符合设计标准。通过小震工况下的时程振动实测可得，建筑最大层间位移角比规范规定的控制值更小；对比普通中心支撑钢结构，本结构底部承受的地震剪力明显下降。楼层上部的变形约束主要依靠粘滞流体阻尼器（VFD）实现，楼层下部整体刚度依靠屈曲约束支撑（BRB）保障，两类减震构件配合作用，顺利实现预设抗震设计标准。另外全部减震部件都采用外部可拆装连接构造，不用切割、改动主体钢梁钢柱就能单独替换，单件构件更换施工用时少，能够实现震后快速维修复原，符合韧性建筑的建设要求。

8 结论

采用 BRB 金属消能支撑搭配 VFD 粘滞阻尼器的组合

减震方案，两者作用互补，减震效果比只装单一构件更好。现场用上三维激光扫描精准定位、双百分表校正同轴度、分段穿插施工这三项工艺，妥善解决构件对不齐、偏心漏油、各工序打架等施工问题，整体安装合格提高。构件采用外部螺栓销轴拼接，损坏部件能单独拆换，不用破坏主体结构，完全符合可修复、高韧性的抗震设计思路。

[参考文献]

- [1]关海涛.将可更换构件与集中消能减震技术应用于既有建筑改造的探讨[C].北京:中国建筑工业出版社,2020.
- [2]李晓丽,王洪欣,樊则森,等.消能减震技术在装配式钢-混凝土组合主次结构中的应用[J].施工技术,2020,49(8):5-8.
- [3]孟凡侠.减震技术在增层工程中的应用研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2015.
- [4]汪永宇,徐伟,翁元滔,等.钢骨建筑抗震评估与耗能减震构件简化模拟[J].同济大学学报(自然科学版),2013,41(10):1455-1462.

作者简介：郭少华（1987—），男，天津西城区人，高级工程师，河北工业大学城市学院土木工程专业毕业，现就职于中信建设有限责任公司，从事建筑工程施工管理工作；齐岩（1978—），男，北京城区人，高级工程师，沈阳航空工业学院消防工程专业毕业，现就职于中信建设有限责任公司，从事建筑工程施工管理工作；杨广鹤（1982—），男，河北廊坊人，中央广播电视大学土木工程专业毕业，工程师，现就职于中信建设有限责任公司，从事建筑工程施工安全管理。