

摩擦摆隔震支座在超高层连体结构的应用及质量控制

褚显敏 刘力 韩小会 韦王睿 马永军

中国建筑第八工程局有限公司, 广东 深圳 518000

[摘要]城市飞速发展带来了人口聚集、用地紧张等问题,伴随着现代都市居民对于居住、消费、休闲、娱乐、社交多种形态的高品质生活越来越高的需求,在城市优越地段及区域,越来越多的超高层城市综合体应运而生。在超高层城市综合体中,高空连桥结构串联着建筑群,是城市综合体的“通道树型交通体系”的重要组成部分,其创造了优质的户外休闲娱乐交互空间,并提供绝佳的城市观景平台。高空连桥为不仅为超高层城市综合体带来了独特的视觉观感,同时也在建筑功能中担当着串联交互的关键职能。

[关键词]摩擦摆隔震支座;超高层连体结构;应用;质量

DOI: 10.33142/ec.v5i10.7003

中图分类号: TU352

文献标识码: A

Application and Quality Control of Friction Pendulum Isolation Bearing in Super High-rise Connected Structure

CHU Xianmin, LIU Li, HAN Xiaohui, WEI Wangrui, MA Yongjun

China Construction Eighth Engineering Division Corp., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

Abstract: The rapid development of the city has brought about problems such as population aggregation and land shortage. With the increasing demand of modern urban residents for high-quality life in various forms such as living, consumption, leisure, entertainment and social intercourse, more and more super high-rise urban complexes have emerged in the superior areas and regions of the city. In the super high-rise urban complex, the high-rise bridge structure is connected with the building group. It is an important part of the "channel tree type traffic system" of the urban complex. It creates a high-quality outdoor leisure and entertainment interaction space and provides an excellent urban viewing platform. The high-altitude connecting bridge not only brings a unique visual impression to the super high-rise urban complex, but also plays a key role of series interaction in the building function.

Keywords: friction pendulum isolation bearing; super high-rise connected structure; application; quality

高空连桥结构的受力特性不同于普通的桥梁结构,高空连桥的存在使得整体结构体系产生平扭耦联振动,受力形式更为复杂。并且高空连桥所在位置较高,支撑连桥的各塔楼侧向刚度不同,在水平地震作用下,连接各塔楼的连桥将会产生较大的相对变形。如何应对风荷载以及地震的双重考验,合理设置连桥与各塔楼间的衔接形式,有效降低连接体的地震及风荷载响应,促使主体塔楼及连桥的受力更加合理,是在设计阶段需重点考虑的问题之一。随着建筑结构减隔震技术日益发展成熟,摩擦摆隔震支座这一原本被广泛应用于桥梁工程中的隔震装置,逐渐成为建筑结构设计师实现连体结构柔性连接,释放内力作用的选择之一。

摩擦摆隔震支座是一种通过球面摆动延长结构振动周期和滑动界面摩擦消耗地震能量实现隔震功能的支座。其工作原理是钟摆原理,借助结构的上下摆动及接触面的摩擦实现结构自振周期的延长,以耗散输入的地震能量。借助摩擦面的曲率可以促使回复力的形成,使得摩擦摆支座所支承的结构在自重作用下向中心位置回复。本文试以岁宝国展项目为例介绍摩擦摆隔震支座的实际应用及质量控制方法。

1 本项目工程概况

本工程由4栋塔楼、1座商业裙房及5层地下室组成, A栋塔楼地上54层,建筑高度194.4m; B栋塔楼地上42层,建筑高度155m; C栋塔楼地上52层,建筑高度242.77m; D栋塔楼地上58层,建筑高度247.33m; 总建筑面积达41.29万 m^2 。空中连桥位于A、B、C三栋塔楼之间(40F~41F),连桥底层标高约141m,顶层标高约145m。AB连桥底层连通A栋40MF与B栋40F,顶层连通A栋41F与B栋41F,跨度为22.25m。BC连桥底层连通B栋40F与C栋30F,顶层连通B栋41F与C栋31F,最大跨度约33.6m。AB连桥设置4个设计承载力为10000KN的摩擦摆隔震支座分与A塔、B塔连接; BC连桥设置4个设计承载力为15000KN的摩擦摆隔震支座分与B塔、C塔连接。

2 摩擦摆隔震支座构造

摩擦摆支座主要由上座板、中座板(球冠体滑块)、下座板、锚固件(锚栓、连接套筒)、连接板、紧固件等零部件组成。上下座板采用铸钢件,其与中座板(球冠体滑块)的摩擦面为贴焊有不锈钢板的凹球面;中座板(球冠体滑块)基础钢件采用铸钢件,其凸球面与上下座板凹球面具有同样的曲率半径,并装配有改性超高分子量聚乙烯滑板。

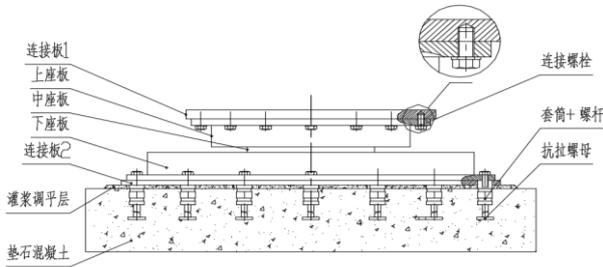


图1 摩擦摆隔震支座安装图

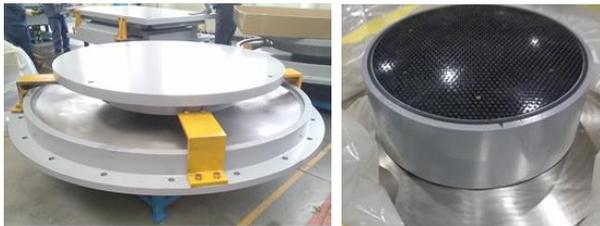


图2 摩擦摆隔震支座实物图

3 摩擦摆隔震支座质量控制

3.1 摩擦摆加工质量控制

(1) 材料采购及验收

摩擦摆隔震支座作为本工程超高连体结构的重要隔震构造,必须重点检查支座厂家对原材料的采购及验收管理制度,对不锈钢滑板、改性超高分子量聚乙烯滑板、黏结剂、连接钢板、锚固件、紧固件等重要原材,应按规范进行相关检验及试验,合格后方可投入使用。

表1 重要原材及检、试验项

序号	原材	检验、试验项
1	不锈钢	化学成分分析、力学性能(拉伸、硬度)
2	铸钢件	超声波检测、化学成分、力学(屈服强度、抗拉强度、伸长率、收缩率、冲击功)
3	改性超高分子量聚乙烯滑板	密度、拉伸、断裂伸长率、球压痕硬度、拉伸弹性模量、初始静摩擦系数、线磨耗率
4	黏结剂	剥离强度
5	连接钢板	化学成分分析、力学性能(拉伸、弯曲、冲击)
6	锚栓、套筒、紧固件	化学成分分析、力学性能
7	橡胶防尘裙	硬度、拉伸强度、伸长率、压缩永久变形、热空气老化、耐臭氧老化、脆性温度

其中,改性超高分子量聚乙烯滑板初始静摩擦系数及线磨耗率对于摩擦摆支座的隔震性能尤为关键。滑板初始静摩擦系数的检验,采用两个样品与中间镜面不锈钢对磨,竖向压力 45MPa,首先预压 1 小时,再以横向水平 0.4mm/s 的滑动速度,滑动 10mm 进行测试,取三组试验的平均值作为试验结果。滑板的线磨耗率检验,采用两个样品与中间镜面不锈钢对磨,竖向压力 45MPa,横向水平 15mm/s 的滑动速度,相对往复距离滑动±10mm 进行测试,累计磨耗行程应达 15km。

(2) 零部件检验

重点检查连接板直径、板厚、孔径、孔距平面度;检查上、中、下座板球半径、球面度、弦长、铸件有无裂痕、气孔、缩孔、砂眼、渣孔等缺陷,并检测防腐涂层厚度。

(3) 总装检验

检查不锈钢平面度、球面轮廓度、不锈钢与凹球面焊接质量、不锈钢与基层钢件的贴密度、滑板与基层钢件凹槽的装配间隙、中下座板的滑板外露高度、滑板储脂坑填满程度及排列方向是否符合规范要求。

(4) 支座性能检验

依据《建筑摩擦摆隔震支座》(GB/T 37358-2019)相关规定,对支座性能进行检验,检验项目为竖向压缩变形、剪切性能试验(静摩擦系数、动摩擦系数、屈服后刚度)。检测项目及检测要求见下表 2。

表2 支座性能检验项目及检验要求

检测性能	检测项目	检测要求
压缩性能	竖向压缩变形	在竖向压力为 2 倍基准竖向承载力作用下,不出现破坏,无脱落、破裂、断裂等;且竖向压缩变形不大于支座总高度的 1%或 2mm 两者中较大者。
剪切性能	静摩擦系数 动摩擦系数 屈服后刚度	0.03~0.04, 且不大于动摩擦系数的上限的 1.5 倍。 试验位移取极限位移的 1/3, 取 400mm, 水平加载速度为 10mm/s。动摩擦系数: 0.025~0.035; 当设计摩擦系数大于 0.03 时检测值与设计值的偏差单个试件应在±25%以内; 当设计摩擦系数不大于 0.03 时检测值与设计值的偏差单个试件应在±0.0075 以内。

鉴于国内能够容纳水平尺寸为 $\phi 2480\text{mm}$ 的摩擦摆隔震支座的试验机所能加载的竖向压力实际小于 20000KN,在实际操作中,可参考《桥梁双曲面球型减隔震支座》(JT/T927-2014)的相关规定,设计承载力为 10000KN 的支座的压缩性能试验荷载可定为支座竖向承载力的 1.5 倍,即 15000KN。

3.2 摩擦摆隔震支座安装质量控制

(1) 安装准备

①组织机构

摩擦摆隔震支座安装,由施工单位技术负责人、现场施工员、支座厂家技术代表组成施工小组,由建设单位、监理单位相关负责人组成质量验收小组,保障摩擦摆支座施工质量。

②支座进场验收

检查原材检测报告、过程记录、产品质量证明书、出厂检验报告、型式报告及其他必要证明文件,并对支座进行进场质量验收。

③技术准备

熟悉图纸、规范要求,编制专项施工方案并报审,由施

工单位技术负责人组织监理、相关管理人员、劳务现场负责人、技术负责人班组长进行支座专项施工方案交底。经技术复核后，在支座基础钢筋绑扎阶段、支座预埋阶段、支座基础混凝土浇筑阶段、支座吊装阶段分别组织钢筋班组、预埋班组、混凝土浇筑班组、支座吊装班组所有参与施工的人员进行技术交底。开展工序互检，下一道工序施工前对前道工序施工质量进行检验，并做好交接手续，并报监理单位复核。所有涉及到隐蔽工程的必须报监理验收通过后方可进行。

④设备、场地准备

做好机具及辅助材料、准备工作，如起重机械、焊机、测量仪器、手动工具及其他辅助用具。提前规划材料进场路线、卸车点、临时堆放场地。

(2) 支座安装

①支座锚栓及连接板安装

由于摩擦摆支座预埋锚栓的数量众多，直径较大，安装时易与支座基础的箍筋发生冲突，导致无法精确安装；且锚栓与支座基础现浇的安装方式，支座锚栓及连接钢板容易在混凝土浇筑过程中受到扰动导致偏位。针对以上两个施工难点，特采取支座基础与基础下方楼板分次浇筑，使用木模及PVC管材等比制作定位模具，实地放样，确保钢筋不与支座基础箍筋发生碰撞，并制作固定调平支架，以便固定并调平支座预埋钢板及锚栓。

首先使用木模及PVC管材等比制作定位模具，以复核支座基础竖筋插筋位置（竖筋位置决定箍筋位置，而箍筋必须确保不与锚栓发生碰撞），通过调整下部梁板钢筋及支座基础竖筋插筋位置，进而调整支座基础的箍筋位置。确保支座基础箍筋不与锚栓碰撞后，在支座基础下部、中部、上部保留三道箍筋，以固定插筋位置，以防支座基础插筋在下部梁板浇筑过程中发生位移或倾斜。而后在下部梁板面筋上测放固定调平支架埋件位置，放置预埋件后进行下部楼层混凝土浇筑。待混凝土达到强度后拆除临时固定用的三道箍筋，安装固定调平支架，固定调平支架与埋件焊接固定。连接板与锚栓组合后吊装（套筒与连接板下表面对称点焊两处即可，严禁满焊，满焊会导致连接板变形），连接板圆周均匀设置有4个吊耳，钢丝绳穿过4个吊耳起吊，要求起吊过程中保持连接板处于水平状态，避免失稳倾斜或倾覆。连接板与锚栓作为整体吊装至支架上调平后固定，将连接螺栓穿入连接板上的螺栓孔，并对外连接螺栓外露螺纹进行保护。



图3 定位模具安装



图4 调平固定支架安装



图5 支座连接板及锚栓安装



图6 连接螺栓外露螺纹保护

②支座基础钢筋绑扎

支座基础箍筋绑扎前，需对下部梁板与支座基础的混凝土交界面进行凿毛处理，妥善清理浮渣后方可进行箍筋绑扎。支座基础箍筋过程中旁站监督，防止钢筋绑扎过程中的野蛮施工造成预埋锚栓及连接板移位。按照设计图纸进行钢筋绑扎，严格控制基础标高、钢筋数量、规格及间距。

③支座基础混凝土浇筑

支座连接板设置有浇灌孔，混凝土浇筑为分层振捣浇筑，每层浇筑厚度控制在500mm以内，分层浇筑过程中利用振动棒进行振捣，保障振捣充分均匀，浇筑时间不宜过长，保持连续性。浇灌过程中严格控制浇筑标高，落在支座连接板上表面的浮浆及混凝土需在初凝前清理干净。支座基础混凝土初凝后立即进行覆盖并洒水养护，脱模后检查浇筑质量。待养护7d后（混凝土强度达到设计强度的75%）开展上部摩擦摆隔震支座的安装。

④支座吊装

支座在设计时考虑吊装方便性，AB连桥的KZQZ-10000±1000支座组合单重6.9吨，满足现场塔吊起吊能力，整体组装发运整体吊装。

BC连桥的KZQZ-15000±1000支座组合单重8.6吨，超出现场塔吊起吊能力，采用分体吊装方式，将支座分为下座板与中座板组合及上座板与连接钢板组合，支座的中座板通过3个连接板与下座板临时固定组合后吊装，下座板圆周均匀设置有4个吊耳，钢丝绳穿过4个吊耳起吊，要求起吊过程中下座板保持处于水平状态，避免失稳倾斜或倾覆。将支座落于下连接板上，使支座螺栓孔与下连接板螺栓孔对齐，将连接螺栓穿过支座螺栓孔与预埋套筒拧紧。注意安装过程中保护支座滑动面，严禁任何杂物落入支座，以免影响支座不锈钢面滑动。



图7 下座板+中座板组合后吊装示意图

支座的座板上与上连接板组合后吊装，上连接板圆周均

匀设置有4个T型吊具,钢丝绳穿过4个吊具起吊,要求起吊过程中使上连接板处于水平状态,避免失稳倾斜或倾覆。AB连桥支座不需要进行拆分吊装,利用下座板圆周均匀设置的4个吊耳4点起吊,要求起吊过程中支座保持处于水平状态,避免失稳倾斜或倾覆。安装前使用Z型临时固定装置对支座上下座板进行可靠连接,保证在后期上部连桥结构施工过程中,摩擦摆支座不发生任何滑移或者错位。



图8 Z型临时固定装置

支座安装完成后,根据支座型号制作对应尺寸的防护罩,防护罩以角钢作为支撑骨架,上覆不锈钢板,并在四周设置橡胶防水、防尘罩,并在支座附近设置警示牌,禁止在支座上堆放任何材料。



图9 支座防护罩支撑骨架及不锈钢板



图10 支座防尘罩

4 质量验收

摩擦摆隔震支座的质量验收参照《建筑隔震工程施工及验收规范》(JGJ360-2015)。

支座连接件的尺寸偏差应符合下表规定。

表3 连接板平面尺寸允许偏差 (mm)

连接板直径或边长	厚度	
	≤30	>30
≤1000	±2.0	±2.5
1000~2500	±2.5	±3.0

表4 连接板螺栓孔位置允许偏差 (mm)

连接板直径或边长	允许偏差
400~1000	±0.8
1000~2500	±1.2

表5 地脚螺栓外径尺寸允许偏差 (mm)

公称直径	尺寸允许偏差	不圆度允许偏差
≤20	±0.4	公称直径公差50%
20~30	±0.5	公称直径公差50%
30~50	±0.6	公称直径公差50%
50~80	±0.8	公称直径公差65%
80~110	±1.1	公称直径公差70%

表6 地脚螺栓长度尺寸允许偏差 (mm)

长度	≤50	50~80	80~120	120~150	150~180	180~220	220
允许偏差	±1.25	±1.50	±1.75	±2.00	±4.00	±4.60	±5.00

高程控制点以建设单位提供的基准点建立高程控制体系,对基础面的高程控制,采用水准仪常规高差测量,直接测得预埋件面的标高。预埋件的标高允许偏差为2.0mm;预埋板的水平度进行精确测量,使预埋板的水平度保持在1/300之内。

表7 支座安装位置的允许偏差和检验方法

项目	允许偏差	检查数量	检验方法
支座标高 (mm)	±5	全数检查	用水准仪、钢尺测量
支座水平位置偏差	±5	全数检查	用经纬仪、钢尺测量
下支墩(柱)顶面	3%	全数检查	用水准仪、千分塞尺测量
支座顶面	8%	全数检查	用水准仪、千分塞尺测量

5 结语

摩擦摆隔震支座通过滑块与摩擦系数恒定的滑动面球面接触,这一构造具有提供回复力、稳定的耗能能力、允许结构转动及产生任意方向位移等优点。利用自身较强的滞回性能在进入大震时耗散地震能量,采用摩擦摆支座可以有效减轻地震及风荷载的作用,正因如此,摩擦摆隔震支座在高层连体结构的设计中得到越来越多的应用。以岁宝国展项目为例,本文总结了摩擦摆隔震支座质量控制的经验及做法,以便为后续类似工程提供参考。

[参考文献]

- [1] 庄鹏,王尉,韩森.超弹性-复摩擦摆隔震支座的性能试验与数值模拟[J].世界地震工程,2022,38(1):99-109.
 - [2] 杨忠平,雷远德,邓烜,等.某采用摩擦摆隔震支座的钢筋混凝土框架结构设计与分析[J].建筑结构,2021,51(8):1-7.
 - [3] 庄鹏,徐蒙,韩森.新型多功能复摩擦摆隔震支座的滞回特性试验研究[J].施工技术,2020,49(1):1606-1611.
- 作者简介:褚显敏(1969.9-)男,毕业院校:湖北省黄石理工学院工业与民用建筑专业,当前单位:深圳市九州建设技术股份有限公司,总监,中级职称;刘力(1984-)男,武汉工业学院、土木工程,中级工程师;韩小会(1985.8-)男,长安大学,安全工程专业;深圳市晟润丰投资发展有限公司,土建专业经理,中级职称,一级建造师。