

桥台顺桥向抗震结构设计及垫块应用

甘沛鑫 王淑芳

西安培华学院 陕西西安 710125

摘要: 桥梁工程作为交通基础设施的关键节点,其抗震性能直接关系到生命财产安全。顺桥向作为桥梁结构地震响应的主要方向,其抗震设计长期面临刚度控制难、能量耗散不足等技术瓶颈。垫块作为新型抗震构件,通过材料变形与摩擦耗能机制,为顺桥向抗震提供了创新解决方案。本文系统分析顺桥向抗震结构设计中垫块应用的工程意义,从刚度匹配、材料选型、节点构造等方面阐述技术要点,并提出结构体系优化、垫块科学选配、施工规范管理等实践策略,为提升桥梁顺桥向抗震性能、保障工程安全提供技术参考。

关键词: 顺桥向抗震;垫块应用;结构设计;能量耗散;刚度控制

引言

我国地处环太平洋地震带与欧亚地震带交汇区域,地震活动频繁且强度大,桥梁工程面临严峻的抗震考验。近年来多次震害调查表明,桥梁在顺桥向地震作用下易发生支座破坏、落梁等严重破坏模式,造成交通中断和重大经济损失。传统抗震设计多侧重横桥向,对顺桥向地震响应特性认识不足,抗震措施针对性不强,垫块作为置于梁端与墩台之间的缓冲构件,通过其特殊的力学性能和耗能特性,能够有效控制顺桥向位移、耗散地震能量、保护关键构件,为解决顺桥向抗震难题开辟了新途径。深入研究顺桥向抗震结构与垫块应用技术,对提升桥梁抗震安全水平具有重要意义。

一、顺桥向抗震结构设计及垫块应用的意义

(一) 提升桥梁结构抗震性能,保障工程安全

顺桥向抗震设计中加入垫块构件后,桥梁结构的抗震能力得到了根本性的提升,结构破坏模式也随之发生转变。传统的顺桥向抗震体系依靠支座的摩擦力、挡块的限位作用,当地震力超过设计阈值时,支座会因剪切破坏或者脱空,挡块在冲击荷载下发生崩裂,导致梁体失去约束,产生过大位移甚至落梁。垫块的介入改变了这个脆性破坏链条,垫块自身发生压缩变形,材料内部分子链重组,将地震冲击能量转化为热能、塑性变形能,

逐步释放出来,使结构响应由突变式变为渐变式。中小地震时垫块在弹性工作状态下,梁体位移控制到允许的范围内,支座、墩台不致损伤,大震下垫块进入塑性耗能阶段,靠自身的可恢复变形吸收地震能量,防止墩柱、盖梁等关键构件开裂或者倒塌。

(二) 优化能量耗散机制,减小震害损失

顺桥向抗震结构中垫块的主要作用就是形成高效的能量耗散体系,该体系依靠一系列的物理过程来实现地震能量的快速消耗。垫块材料一般采用高阻尼橡胶、聚氨酯弹性体或者纤维增强复合材料等,在循环荷载作用下表现出明显的滞后特性,应力应变曲线呈椭圆形或者梭形,围成的面积即为单次循环耗散的能量。顺桥向地震波激励下梁体往复运动,垫块反复被压缩回弹,垫块内部分子链断裂重组、晶格错位滑移、微裂纹扩展闭合等微观机制不断消耗输入能量,传递到下部结构的地震力大大减少^[1]。合理的垫块系统可以消耗掉40%到60%的输入地震能量,相当于给结构加了一道能量屏障,耗能机制的优化在于宽频带适应,垫块根据场地地震谱特点用材料配比、几何尺寸进行定制,使垫块在共振频段内具有最好的耗能效率。

(三) 延长桥梁使用寿命,降低维护成本

顺桥向抗震结构中垫块的应用能够使桥梁全寿命周期成本大幅度降低,而降低的源头在于垫块对结构疲劳累积损伤的有效抑制。桥梁在服役过程中除承受强震外,还经常受到交通荷载、温度变化、风致振动等低频高频循环荷载的作用,虽然单次幅值小,但是累积效应会导致支座老化、梁端混凝土开裂、钢筋锈蚀等疲劳损

作者简介: 甘沛鑫(2001.07—),男,汉族,陕西省安康市,西安培华学院,本科,研究方向:桥梁抗震研究及优化设计。

伤,最终缩短结构的使用寿命。垫块引入,在梁端形成柔性缓冲层,对各种动力荷载起到隔振的作用,支座和梁端的受力条件也得到根本性的改善。在车辆制动、启动时产生的顺桥向冲击荷载的作用下,垫块先发生微小的变形来吸收冲击能量,支座只承受经过滤波的平滑荷载,应力幅值降低30%—50%,疲劳寿命按S-N曲线计算可以延长数倍。温度变化引起的梁体伸缩由垫块柔性特征得以释放,没有传统固体体系中温度应力累积的现象,减少混凝土温度裂缝。震后检测得出,使用垫块的桥梁即使经受大地震依然能保持良好的支座、梁端构造,而传统结构常需更换支座修补裂缝,维修费要高出多倍。

二、顺桥向抗震结构设计及垫块应用的技术要点

(一) 结构体系的刚度匹配与位移控制技术

顺桥向抗震设计的第一技术要点就是上部结构、垫块系统与下部结构的刚度要合理匹配,决定地震下变形模式及内力分布。刚度匹配的核心是调整构件的刚度比例,使得顺桥向响应具有预期的耗能机制和破坏顺序,垫块刚度过大,如同刚性挡块,地震力直接传给下部结构;垫块刚度过小,则丧失位移控制能力,容易造成落梁事故。合理匹配即垫块小震下有足够的约束,大震下优先塑性耗能保护墩柱,设计时通过动力时程分析确定不设垫块时梁端位移需求和墩顶承载能力,反推垫块应提供的等效刚度和阻尼,使梁端位移控制在支座容许范围内,墩柱内力不超过塑性铰承载力。位移控制技术通过垫块刚度-位移曲线分阶段设计实现,初始高刚度限制小位移,随着位移增大刚度软化进入耗能平台,极限位移处再次硬化防止失稳,多阶段刚度特性通过多层材料组合或者变截面设计来实现。

(二) 垫块材料的力学性能与耗能特性分析

顺桥向抗震垫块性能根本上依靠材料力学性质和耗能机理,材料选型是运用的关键。理想的垫块材料应该具有高弹性模量、大变形能力、显著滞回耗能以及良好的耐久性。高阻尼橡胶在原有材料中加入炭黑、石墨烯纳米填料或者共混不同的聚合物,使得材料在保持大变形能力的同时获得15%到20%的等效阻尼比,耗能机理是填料和分子链的界面摩擦以及不同相态链段的粘弹性损耗。聚氨酯弹性体凭借可调整的硬度范围和出色的回弹性,改变异氰酸酯和多元醇的比例来获得不同应变阶段的刚度变化^[2]。纤维增强复合材料用碳纤维或者玻璃纤维布复合,纤维高强度保证承载能力,为树脂开裂和

界面剥离提供耗能途径,材料性能分析需用单轴压缩试验获取应力应变全曲线来确定弹性模量、屈服强度、极限应变、等效阻尼比;通过循环加载试验考察滞回稳定性、刚度退化;通过不同应变率试验揭示速率相关性来为地震分析提供本构模型参数。

(三) 节点连接的构造设计与施工工艺要求

顺桥向垫块与梁体、墩台连接节点为保证性能的发挥。节点要解决三个问题,垫块和混凝土界面可靠粘结防止剥离,垫块受力均匀防止应力集中撕裂,便于施工安装和震后检查更换。粘结用化学粘结和机械锚固相结合,接触面涂上高强度环氧粘结剂,在垫块内预埋钢板或者穿孔钢筋锚固到混凝土中形成剪力键。受力均匀化通过增加钢垫板或者分布筋来实现,钢垫板把集中反力分散到垫块全截面。大尺寸垫块内设置钢筋骨架或纤维网格提高整体性,施工工艺中垫块安装前要精密测量预埋件的位置,保证平整度和垂直度的偏差在限定值内。粘贴环境温度5—35℃,湿度<85%,固化期间禁止扰动,完成后做拉拔试验检验黏结质量。安装完成后进行初始压缩量的测量,对预压力进行检测以确认符合设计要求,若不符合则进行调整使垫块处于合理的工作点。

三、顺桥向抗震结构设计及垫块应用的实践策略

(一) 优化结构体系设计,强化整体抗震能力

顺桥向抗震结构体系以垫块为核心来构建多道抗震防线,通过结构布置和构造措施的系统调整来提高整体的抗震能力。优化策表现在支承体系的改造上,传统的板式橡胶支座顺桥向只靠摩擦力提供约束,抗震性能差,应改为盆式支座或者球型支座配合垫块的组合体系,支座提供竖向承载和横向约束,垫块专门负责顺桥向的位移控制和耗能^[3]。分工明确支承体系使各个构件在地震中各负其责,避免了传统支座“一座多能”造成的性能互相制约,结构体系优化还要考虑伸缩缝的合理布置,大跨连续梁桥在墩顶设置垫块的同时,应在梁端预留足够的碰撞余量,通过精细化的非线性碰撞分析确定梁端间隙,防止小震下过早碰撞,避免大震下碰撞力过大。曲线桥梁顺桥向、横桥向地震响应存在耦合现象,垫块的布置要考虑到曲率半径的影响,在曲线的外侧增加垫块或者提高刚度,平衡由离心力引起的附加内力。结构体系的整体抗震能力增强也包含下部结构的延性设计,在墩柱潜在塑性铰区增设约束箍筋、采用纤维增强复合材料加固等手段,提高墩柱的变形能力和耗能能力,使其和垫块形成协同耗能机制。

（二）科学选配垫块材料，提升能量耗散效果

顺桥向抗震垫块材料的科学选配，需要基于桥梁具体工况和地震环境的深入分析，依靠材料性能参数与结构需求的精准对接来达成能量耗散效果的最优。选配策略的第一步是确定垫块的性能要求，即目标刚度、目标阻尼、耐久年限等，这些指标是从结构动力分析、抗震性能要求中提取的。对于中小跨径的简支梁桥，由于梁体质量小，地震惯性力小，应选择刚度适中、阻尼比在15%左右的高阻尼橡胶垫块，在小震时保持弹性，中震时开始耗能，大震时仍有足够变形余量。大跨连续梁桥或者刚构桥上部结构质量大、刚度大，地震力较大，应选用高强度高阻尼聚氨酯或纤维复合材料垫块，高弹性模量可以提供足够的初始刚度，良好的塑性变形能力可以保证大震下的耗能能力^[4]。材料选配还要顾及场地情况，近断层场地的地震动带有速度脉冲效应，垫块宜选用速率相关性不明显者，以免在脉冲荷载下刚度突然增大，软土场地长周期地震波分量多，垫块阻尼可略高些以加强能量消散。环境适应性是材料选配的考虑因素，寒冷地区要选用耐低温的材料，保证在-40℃时仍具有柔韧性，高温地区要选用耐老化性能好的材料，添加抗氧化剂和紫外线吸收剂来延缓材料的降解。

（三）规范施工操作流程，确保应用质量达标

顺桥向抗震垫块应用质量的保障根本在施工过程的细致化管理、操作的标准化执行，任何施工上的差错都有可能使垫块的性能大打折扣甚至彻底失效。规范施工的第一步是建立严格的材料进场检验制度，垫块到场后应抽样进行力学性能复检，包括压缩弹性模量、极限强度、滞回耗能等关键指标，检验合格后才能使用，不合格产品一律退场。材料存放不能被阳光直射、雨水浸泡，堆放高度不应超过三层，防止底层垫块由于长时间受压发生蠕变，安装前的准备，梁端及墩台接触面用角磨机凿毛，凿毛深度2—3mm，露出新鲜混凝土，然后用高压水枪冲洗干净晾干，无浮尘、油污、明水。预埋件的检查要核对位置、尺寸、锚固深度等，发现偏差超过允许

值应立即纠正或者补救，垫块粘贴施工应由经过专业培训的工人进行，粘结剂的配制应按说明书上标明的配比进行，使用电动搅拌器搅拌5分钟以上，配制好的粘结剂应在有效期内使用。粘结剂涂抹要均匀饱满，厚度控制在3到5mm之间，涂抹之后立即将垫块压贴到位，用橡胶锤轻击排除气泡，再用千斤顶施加预压力并保持24小时以上，固化后随机抽取粘结界面做拉拔试验，拉断强度大于1.5MPa，破坏模式为混凝土撕裂而不是界面剥离。

结束语

顺桥向抗震结构设计 with 垫块应用是桥梁抗震技术发展的重要方向，通过引入高性能耗能构件，实现了从单纯依靠强度抵抗向“刚柔并济、以柔克刚”耗能减震的理念转变。实践表明，科学的垫块应用能显著提升顺桥向抗震性能，减小震害损失，延长使用寿命。然而垫块技术仍需在材料创新、施工工艺等方面深化研究，特别需建立更精细的材料本构模型和结构—垫块相互作用分析方法，开发适应不同桥型和地震环境的垫块系列产品，完善从设计、施工到运维全过程的技术标准体系。随着高性能材料、数值模拟等技术进步，顺桥向抗震垫块必将获得更广泛应用，为保障交通基础设施地震安全、服务经济社会高质量发展作出更大贡献。

参考文献

- [1] 肖鉴宇. 山区连续梁桥横桥向抗震性能分析[J]. 交通科技与管理, 2023, (16): 111-113.
- [2] 刘攀, 项敬辉, 李建中, 等. 连续梁桥纵桥向组合型减隔震支座抗震性能及抗震参数研究[J]. 振动工程学报, 2025, 38(5): 1078-1086.
- [3] 郭志鹏. 现浇超高墩连续刚构桥横桥向抗震性能分析[J]. 土木工程, 2024, 13(6): 1000-1005.
- [4] 李长坤, 魏玲利. 基于Pushover方法的双柱墩横桥向抗震容许位移数值分析[J]. 计算机应用文摘, 2025, 41(3): 172-174.