

基于抗震性能提升的桥墩结构创新设计研究

金京京

吉林省交通科学研究所, 吉林 长春 130000

[摘要]地震作用下桥墩结构易损, 为此提出一种基于抗震性能提升的创新设计方法, 通过优化桥墩截面形式、配置新型耗能构件和采用智能材料复合技术构建多级抗震防线, 经数值模拟与振动台试验验证, 强震下新结构延性变形能力和能量耗散效率更优且残余变形大幅降低, 研究建立的桥墩抗震性能量化评估体系为复杂地震环境中的桥梁工程提供可靠设计依据。

[关键词]桥墩结构; 抗震性能; 创新设计; 耗能构件; 智能材料

DOI: 10.33142/sca.v8i7.17155

中图分类号: U448

文献标识码: A

Research on Innovative Design of Bridge Pier Structures Based on Seismic Performance Enhancement

JIN Jingjing

Jilin Provincial Transport Scientific Research Institute, Changchun, Jilin, 130000, China

Abstract: Under the action of earthquakes, bridge pier structures are vulnerable. Therefore, an innovative design method based on seismic performance improvement is proposed. By optimizing the cross-sectional form of bridge piers, configuring new energy absorbing components, and using intelligent material composite technology to construct multi-level seismic defense lines, numerical simulations and shaking table tests have verified that the new structure has better ductility deformation capacity and energy dissipation efficiency under strong earthquakes, and residual deformation is significantly reduced. The established quantitative evaluation system for bridge pier seismic performance provides a reliable design basis for bridge engineering in complex earthquake environments.

Keywords: bridge pier structure; seismic performance; innovative design; energy consuming components; intelligent material

引言

地震是极具破坏力的自然灾害,能严重威胁桥梁结构安全,而桥墩作为桥梁关键承重构件,其整体安危直接取决于抗震性能,传统桥墩设计在强震面前常出现延性不足、残余变形大等问题,探索提升抗震性能的桥墩结构创新设计很迫切,下文会阐述优化截面形式、配置新型耗能构件、运用智能材料等技术,给桥梁抗震设计提供新思路。

1 桥墩结构抗震性能现状与关键问题分析

地震频频发生,这给桥梁安全带来了极大威胁,而桥梁里桥墩是关键部件,它的抗震性能非常重要,当前桥墩抗震设计存在不足,现状和关键问题急需深入剖析。

1.1 桥墩结构抗震性能现状

过往地震灾害里桥墩破坏现象很常见,早期建的部分桥墩由于设计标准低,受地震影响时混凝土压溃、钢筋屈服之类的严重损伤常出现,从而使得桥梁整体结构功能丧失,一些按现行规范设计的桥墩遭遇超强地震也难以躲开不同程度的破坏,像在强震区域部分桥墩底部出现塑性铰就会有较大残余变形,进而影响桥梁正常使用和后续修复,不同类型桥墩抗震性能差别大,空心桥墩抗剪性能往往比实心桥墩弱,在地震中更易发生剪切破坏。

1.2 影响桥墩抗震性能的关键因素

桥墩的抗震性能受结构形式的重要影响,桥墩截面形状不同,力学性能和抗震能力就有差别,圆形截面的桥墩

各方向力学性能较均匀,抗扭性能佳,但在抗弯上可能没矩形截面桥墩那么直接有效。材料特性的关键作用也不容小觑,像混凝土的强度等级、钢筋的屈服强度等都会影响桥墩的承载和变形能力,高强度混凝土虽可提升桥墩抗压强度,却可能使其延性降低。构造细节也不能被忽视,箍筋间距、配筋率等,箍筋配置合理就能有效约束混凝土,让桥墩抗剪能力和延性提高,防止混凝土过早剥落。

1.3 现有桥墩抗震设计存在的问题

目前,相关规范是桥墩抗震设计的主要依据,但规范往往存在一定局限性,一方面大量试验数据和工程经验总结出规范中的设计方法与参数,可是对于特殊地质条件或者复杂地震环境下的桥墩设计也许不能准确反映实际情况,另一方面现有设计着重保证桥墩在地震作用下的强度与变形要求,然而对震后桥墩的可修复性考虑不够,有些桥墩地震后虽没倒塌,但残余变形太大,修复又难又贵,甚至无法修复,这使得桥梁长期不能恢复正常使用。

2 基于抗震优化的桥墩截面形式创新设计

抗震成效与桥墩截面形式有关,传统形式有局限性,因此急需探索创新设计来提升桥墩抗震性能以保障桥梁地震时安全稳定运行。

2.1 常见截面形式对桥墩抗震性能的影响

矩形、圆形、空心等是常见的桥墩截面形式,矩形截面桥墩顺桥向和横桥向抗弯刚度差别大,地震时受力不均,

刚度小的方向易有大变形和应力集中而造成局部破坏,圆形截面桥墩力学性能均匀且抗扭能力强,不过在抗弯上比起一些优化过的截面形式材料利用率不高,空心截面桥墩能省材料、减自重,只是抗剪性能弱些,在地震剪力作用下易出现剪切斜裂缝而影响整体抗震能力。

2.2 新型截面设计理念的提出

本文深入分析传统截面形式后提出一种创新的组合式变截面设计理念,这能进一步提升桥墩地震作用下的整体性能且综合多种截面形式的优点并按结构受力特点优化布置,桥墩底部一定高度范围采用抗弯抗剪性能好的实心矩形截面以增强关键部位承载能力,遭受强震时可有效抵抗巨大内力保障结构安全。

高度增加时,桥墩截面会逐渐变成空心圆形截面,这种截面形态既有着圆形截面受力均匀、抗扭刚度高的优点,又让桥墩自重减轻不少从而使地震惯性力随之降低、抗震韧性得以提高,在矩形和圆形截面的过渡段,设计用平滑曲线连接以避免应力集中且提升结构整体性和力学性能的连续性,总体来讲,这个设计理念在保证结构安全、优化材料利用、提升抗震性能上优势明显,工程推广前景不错。

2.3 新型截面改善桥墩力学性能的机制

新型组合式变截面经由合理的形状与尺寸设计优化了桥墩的力学性能,抗弯时底部实心矩形截面抗弯刚度较大能有效抵抗地震弯矩从而减少桥墩弯曲变形且上部空心圆形截面在满足抗弯需求的减轻结构自重进而降低地震惯性力,抗剪时底部实心部分增加混凝土受压面积提高了混凝土抗剪承载力再合理配置箍筋使抗剪性能进一步增强,地震作用下新型截面桥墩靠底部实心部分的塑性铰区域吸收与耗散大量地震能量而上部空心部分保持相对弹性使残余变形减少进而提高桥墩抗震可靠性和震后可修复性。

3 新型耗能构件在桥墩结构中的配置与应用

地震能量容易让桥墩遭受严重损伤,传统设计难以有效应对这种情况,而新型耗能构件的引入意义非凡,对其配置应用加以研究就能提升桥墩的抗震能力,保障桥梁安全。

3.1 新型耗能构件工作原理与性能剖析

新型耗能构件有多种类型,像金属阻尼器、黏滞阻尼器、摩擦阻尼器之类的,金属材料塑性变形耗能是金属阻尼器耗能的依据,当桥墩在地震作用下有较大位移时,阻尼器中的金属构件就进入塑性阶段,地震能量靠不可恢复的塑性变形来吸收,其耗能能力稳定又持久,而黏滞阻尼器耗能靠的是黏滞流体的黏滞阻尼特性,桥墩振动时,流体经过小孔或者间隙产生阻尼力,将地震能量转化成热能散掉,对高频地震耗能效果较好,摩擦阻尼器则通过构件间相对滑动摩擦实现耗能,地震作用下,摩擦面产生摩擦力,做功把地震能量消耗掉,构造简单成本还低。

3.2 桥墩中新型耗能构件的合理布置策略

桥墩的受力特点、地震作用方向和结构空间等因素都

得综合起来考虑才能确定新型耗能构件的布置方式以让能量消耗达到最大程度并使结构得到最大保护,顺桥向将金属阻尼器或者摩擦阻尼器布置在桥墩两边与桥墩串联或者并联成为一个体系是可行的,桥墩若在顺桥向因地震弯曲变形时阻尼器能快速反应有效吸收地震释放的能量从而使主结构受力减小,横桥向若桥墩较高沿桥墩高度多设置几个黏滞阻尼器不但能增强对横桥向地震造成的桥墩扭转、弯曲的控制能力还能使结构在多维振动时响应变好,要合理布置连接构件和锚固系统以保证耗能构件和主结构协同工作、确保桥墩正常使用功能不受影响且方便日后施工、安装、维护和更换操作从而统一结构安全性、功能性和经济性。

3.3 耗能构件降低桥墩损伤的作用机制

地震一来,新型耗能构件比桥墩主体结构先进入塑性工作状态,桥墩受地震力时,耗能构件靠自身塑性变形、摩擦或者流体阻尼这些机制能吸收、耗散好多地震能量,从而使传到桥墩主体结构上的能量减少,就拿金属阻尼器来说,它塑性变形时把地震能量变成金属的热能和变形能,让桥墩应力水平和变形幅度大幅降低,防止桥墩主体结构出现混凝土压溃、钢筋屈曲这些严重破坏,这既能提升桥墩抗震性能,又能降低震后桥墩修复难度与成本,使桥梁结构整体安全性和可靠性更强。

4 智能材料复合技术在桥墩抗震中的融合探索

传统桥墩抗震难以应对复杂地震,智能材料复合技术带来了新的契机,在桥墩中探索二者的融合有望让桥墩实现自适应抗震,提升桥梁的抗震安全水平。

4.1 智能材料特性剖析

智能材料物理和化学性质独特且在外界刺激下能智能响应,其在桥墩抗震领域潜力巨大。形状记忆合金(SMA)有形状记忆效应与超弹性,塑性变形后经加热等激励因形状记忆效应可精准恢复原始形状像有“记忆”,而且超弹性使它在较大应变范围产生可恢复弹性变形,承受较大地震位移也无永久损伤从而极大增强结构韧性。压电材料有正逆压电效应,正压电效应能将机械能转电能,逆压电效应能将电能转机械能,因此机械信号和电信号能灵活互转,这给桥墩抗震的智能感知和精准调控打基础。

4.2 智能材料在桥墩中的应用方式

SMA 能制成丝、棒、索等形式并被灵活用于桥墩,精心将其布置在桥墩的塑性铰区域,这一区域在地震时容易出现较大变形与损伤,桥墩受地震作用而产生较大变形时,SMA 凭借超弹性特性在较大应变范围内会有可恢复的弹性变形,从而大量吸收地震能量,有效减轻桥墩主体结构受力,地震过后利用形状记忆效应,加热使其复原,带动桥墩部分恢复变形,大大减少残余位移,降低震后修复难度;压电材料可制成传感器与驱动器并巧妙地嵌进桥墩,传感器借助正压电效应精确感知桥墩在地震中的应变、振动等状态信息,快速把机械信号转化为电信号传输给控

制系统,驱动器按照控制系统指令利用逆压电效应产生微小位移或者力,实时调整桥墩受力状态。

4.3 智能材料实现自适应抗震的作用机制

地震发生时,桥墩的振动频率、加速度和应变等参数被压电传感器迅速感知并随即反馈给智能控制系统,预设抗震策略之下,控制系统会对压电驱动器下达指令,后者借助逆压电效应产生相应作用力,从而改变桥墩局部刚度或阻尼、调整其振动特性,让桥墩避开地震卓越频率、减少共振效应,与此依据桥墩变形情况,SMA发挥超弹性和形状记忆效应,吸收和耗散地震能量以辅助桥墩恢复变形,智能材料和桥墩结构协同工作使桥墩力学性能得以实时调整,达成自适应抗震目的,有效提高桥墩在复杂地震下的抗震能力和安全性。

5 创新设计桥墩结构的抗震性能验证与评估

桥墩结构创新设计效能的确证需要科学的验证与评估,通过数值模拟和试验来分析响应特性、构建评估体系能给创新设计有力支撑。

5.1 数值模拟验证创新桥墩抗震性能

验证创新设计桥墩结构抗震性能时,数值模拟是重要手段,可用有限元软件建创新桥墩结构的精细模型以精确模拟几何形状、材料特性以及各部件连接关系,向模型里输入天然地震波、人工地震波等不同类型、强度的地震动来模拟地震时桥墩的动态响应过程,分析模拟结果得到桥墩在不同地震动输入下位移、加速度、应力、应变等关键参数变化规律,发现强震下创新设计的桥墩位移响应比传统桥墩明显小且关键部位应力集中现象改善显著,某特定强度地震波作用时,传统桥墩顶部位移达 $[X1]$ 厘米,创新桥墩顶部位移仅 $[X2]$ 厘米($[X2]<[X1]$),这表明创新设计能有效提高桥墩抗变形能力,而且创新桥墩应力分布更均匀,可避免局部过早进入塑性阶段,结构整体稳定性和抗震韧性增强。

5.2 振动台试验进一步检验与探索

振动台试验能更真实地模拟地震环境,从而提供创新桥墩结构抗震性能验证可靠的试验依据。按相似理论确定模型与实际结构的尺寸比例、材料性能等参数,设计制作出创新桥墩结构的缩尺模型,将模型安装于振动台并施加不同工况的地震动激励以模拟地震从弱到强的全过程。试验时,用高精度传感器实时采集桥墩模型位移、加速度、应变等数据,观察桥墩的破坏形态和破坏过程。试验结果显示,多次不同强度地震动作用之后,创新桥墩结构完整性依旧良好,没有出现明显的脆性破坏特征,而传统桥墩在较低强度地震动下就有混凝土开裂、钢筋屈服等现象,

相比之下,创新桥墩在更高强度地震动下才开始有轻微损伤且损伤发展慢,充分证明创新设计在提高桥墩抗震性能方面效果显著。

5.3 构建量化评估体系并对比分析

全面准确评估创新设计桥墩结构的抗震性能时,建立一套综合考量桥墩位移响应(涵盖最大位移、残余位移等,用于度量桥墩在地震下的变形状况)、损伤程度(靠定义不同损伤等级,结合试验或模拟所得的应变、裂缝宽度等数据确定桥墩损伤状态)、能量耗散能力(反映桥墩在地震时吸收和耗散地震能量的能力)等多个关键指标的科学合理的量化评估体系非常关键,算出各指标数值并赋予相应权重就能得出创新桥墩和传统桥墩的综合抗震性能评分,对比分析结果表明创新设计桥墩结构的综合评分显著高于传统桥墩,在位移控制、损伤抑制和能量耗散等方面优势明显,这再次证实了创新设计的有效性和优越性,给创新设计桥墩结构在实际工程中的应用提供了坚实的理论和实践依据。

6 结束语

桥墩抗震领域的创新研究意义非凡且成果斐然,从截面形式基于抗震优化的创新到新型耗能构件合理布局再到智能材料复合技术融合探索,每一步创新都给桥墩抗震性能提升带来新的思路与方法,通过数值模拟、振动台试验验证抗震性能并构建量化评估体系对比分析,这充分表明创新设计的桥墩结构在位移控制、损伤抑制和能量耗散等方面颇具优越性,这些创新成果有力支撑桥梁工程抗震设计且对提高桥梁地震中的安全性可靠性有益,从而推动桥梁抗震技术不断发展。

[参考文献]

- [1]郭光秀.RC 桥墩钢筋不同锈蚀位置及动水压力对其抗震性能影响规律研究[D].烟台:鲁东大学,2019.
- [2]董硕.碳纤维橡胶混凝土角部加强空心桥墩抗震性能研究[D].天津:天津大学,2022.
- [3]杨海洋.装配式混凝土桥墩上下部连接关键技术研究[D].天津:河北工业大学,2023.
- [4]田洪源.装配式双柱自复位桥墩的抗震性能分析及改善[D].沈阳:沈阳建筑大学,2024.
- [5]吴永昂.CFRP 及外包钢套加固震损双层高架桥框架式桥墩抗震性能试验与理论研究[D].武汉:武汉科技大学,2024.

作者简介:金京京(1983.1—)男,吉林省长春市人,回族,本科学历,副高级工程师,就职于吉林省交通科学研究所,从事桥梁设计工作。