

桥梁抗震性能提升技术

姜懿恒^{1,3}, 冯辉², 路明远³, 王健³

(1. 中交第一航务工程局有限公司; 2. 葫芦岛市通运输综合行政执法队; 3. 中交一航局第五工程有限公司)

摘要: 桥梁作为重要的基础设施, 其抗震性能直接关系到交通运输的安全性和连续性。文章围绕桥梁结构抗震性能评估与加固技术展开研究, 系统分析了桥梁抗震性能评估的理论与方法、影响因素以及常用的加固技术。通过对传统和新型加固技术的优缺点进行比较, 探讨了加固方案的选择与优化策略, 并结合典型案例分析了加固技术的实施效果和实际应用中的挑战。研究表明, 合理的评估和科学的加固方案是提升桥梁抗震能力的关键, 同时新技术的应用和智能化加固方法将成为未来发展的重要方向。研究可为既有桥梁抗震加固方案的选取与参数优化作出参考。

关键词: 桥梁抗震性能; 加固技术; 耗能装置; 减隔震

0 引言

桥梁作为交通网络的核心组成部分, 其抗震性能在防震减灾中起着至关重要的作用。随着全球地震活动日趋频繁以及桥梁数量的增加, 桥梁结构的抗震研究已成为土木工程领域的重要课题。现有桥梁中, 建于抗震设计标准尚不完善时期的桥梁不在少数, 其抗震性能难以满足现代需求, 而随着桥梁老化问题的显现, 地震对桥梁的破坏性风险进一步加剧。对桥梁抗震性能的评估与加固不仅是科学研究的热点, 更是工程实践中的紧迫需求。

1 震害特征与抗震性能现状

1.1 我国既有桥梁的震害表现

中小跨径桥梁在地震中经常出现支座滑动、墩柱开裂以及梁体掉落等, 交通功能受到严重破坏^[1]。很多已有的桥梁是在抗震标准不完善的时期建造的, 没有进行系统延性设计, 也没有设置防落梁装置。地震后的调查发现, 支座以及防落梁装置最容易出现问題, 当墩柱进入塑性阶段后, 裂缝会快速扩展, 承载能力明显下降。

将桥墩以及支座在不同地震作用下的损坏情况分成5个等级。在没有损伤的状态下, 桥墩只出现轻微裂缝, 支座位移延性控制在100%以内; 进入轻微损伤阶段时, 纵向钢筋开始发生屈服, 支座位移延性上升到150%; 中等损伤表现为保护层混凝土脱落, 支座相对位移接近200%; 严重损伤状态下塑性铰完全形成, 裂缝继续扩展, 支座位移延性接近250%; 在完全破坏阶段, 箍筋断

裂、混凝土被压碎, 支座丢失承载能力^[2]。

通过分级说明了震害的演进过程, 从细微裂缝到结构整体失效, 桥梁的抗震性能逐步丧失。实际震害案例也印证了损伤状态划分的规律, 桥墩与支座的协同作用决定了桥梁在地震中的整体安全水平。

1.2 支座与防落梁构造的薄弱环节

很多已建桥梁使用普通混凝土挡块、没有锚固的板式橡胶支座, 这种结构在强烈地震中容易发生滑动。震动过程中支座引发的位移会降低结构的稳定性并可能使主梁跟桥台或盖梁之间的防护措施失效, 导致梁体掉落。地震灾害统计表明, 防落梁装置在横向限制方面效果不强, 无法满足不同等级抗震要求^[3]。

三角形钢板耗能挡块的布置方式与结构如图1所示。与传统混凝土挡块相比, 这种装置用钢板塑性变形消耗地震能量, 同时限制支座横向位移。其结构特点是连接简单、容易更换, 可以防止混凝土挡块在强烈地震中发生脆性破坏。

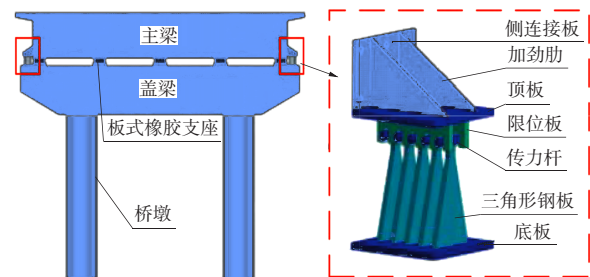


图1 三角形钢板耗能挡块布置形式及构造结构

1.3 抗震性能现状的综合分析

将把震害分级、支座构造特点结合起来,发现现有桥梁抗震薄弱点主要在支座以及墩柱。支座在发生过大位移时很容易失效,当墩柱延性不够时,很难抵抗累积损伤,整体抗震效果无法保证,在三角形钢板耗能挡块这样的新结构引入后,能够改变传统支座系统受力情况,减缓墩柱损伤发展,降低梁体横向移动,为提升桥梁抗震性能提供可行的办法^[4]。

2 抗震性能提升技术及机理

2.1 结构加固方法

既有桥梁在地震中经常因为墩柱或承台抗弯、抗剪能力不够而发生破坏^[5]。对结构中的薄弱部分进行加固,可以增强整体的稳定性,常用的加固方法涵盖增加截面尺寸、外包钢板以及使用纤维复合材料,增加截面的方法是在原有墩柱外面包裹混凝土并布置纵向、横向钢筋,以此提高承载能力、延性,适用于裂缝较多墩柱。

外包钢板方式是让钢板同原结构一起工作因此提升受弯、受剪的能力,纤维复合材料重量轻,用它加固时不会明显增加结构自重,还能提升构件强度。这种材料特别适合用来加强桥墩、盖梁的连接部位,与传统的混凝土包裹方式相比,纤维复合材料施工更方便而且更加耐用。

2.2 减隔震与耗能措施

在传统支座结构中,普通混凝土挡块限位作用不够明显,引入新的耗能装置为提高抗震能力提供了新方法^[6]。三角形钢板耗能挡块依靠钢板发生塑性变形来消耗地震能量,防止传统混凝土挡块出现脆性破坏,三角形钢板和底板、传力杆连接组成耗能单元,在震动时引发弯曲变形以吸收能量。

钢板在荷载作用下表现出悬臂板的形态,其屈服位移以及屈服前刚度可以用材料力学公式进行计算。为了方便设计,提出用双线性本构模型来模拟钢板受力情况,对于三角形钢板耗能型挡块的塑性阶段,可根据钢的双线性本构或者 Ramberg-Osgood 本构关系得到,且这 2 种方法分别在小变形和大变形情况下具有较高的精度。为了方便设计,选择采用欧进萍等提出的简单双线性结构,计算公式为:

$$\alpha = 0.05F_p/K_d$$

$$F_p = n\sigma_y Bt^2 / (4H)$$

式中: σ_y 为三角形钢板的屈服应力, MPa; F_p 为 TADASD 的极限剪力, kN; α 为屈后刚度, kN/m; K_d 为屈服前刚度, kN/m; H 为高度, m; B 为底边宽度, m; t 为厚度, m; n 为钢板数量。

为了测试设备效果,建立一个典型的预应力混凝土连续梁桥的有限元模型,桥墩高度分别是 5.1 m、8 m、13 m。该桥使用的板式橡胶支座力学性能参数见表 1,可以看出不同型号支座在刚度、起滑力以及位移能力方面有差别,这些参数会影响耗能装置与支座之间的配合效果。

表 1 板式橡胶支座力学性能参数

支座型号	h_b /mm	A_b /mm ²	K_b /(kN·mm ⁻¹)	F_b /kN	Δb /mm
GYZ450	71	159 043	2.69	105.35	39.16
GYZF4350	61	96 211	1.89	53.15	28.12

h_b 为支座橡胶层总厚度, mm; A_b 为支座有效承压面积, mm²; K_b 为支座等效水平刚度, kN/mm; F_b 为支座起滑力, kN; Δb 为支座允许(或设计)水平位移, mm。支座以及钢板耗能挡块一起工作时,挡块增加刚度并能消耗能量,支座则表现出滑动耗能的特点。两者配合提升桥梁在横向上的抗震能力,通过不同参数时程分析发现,把三角形钢板耗能挡块布置得当,可以明显减少墩顶位移、支座滑动,使桥梁在强震中的损坏程度得到有效控制。

2.3 防落梁与节点设计优化

地震灾害案例显示,落梁事故通常由支座脱空或防落梁装置失效引起。改进防落梁措施是提高桥梁抗震能力的重要方法,在盖梁与墩柱连接部位,增加连梁可有效分散地震引发的内力,减少盖梁上的集中受力,通过设置连梁改善墩顶受力情况,使墩柱以及盖梁形成更加稳固的整体^[7]。

在桥台设计时,用增加翼墙、加厚墙身或在台背填土区设置密排桩等方法,可以有效减少地震带来倾覆或滑移风险。这些结构的共同特点是改进受力路径、提升耗能能力,把梁体与墩台连接得更牢固,防止强震中因节点损坏而造成整体失效。

3 案例研究与效果对比

3.1 数值建模

为了检验抗震加固方法效果,研究选用典型二级公路连续梁桥^[8]进行计算。该桥为 4 m×20 m 预应力混凝土 T 形连续梁桥,桥面宽 12 m,桥墩为

双柱式圆形结构,高度分别为5.1 m、8 m、13 m,上部结构与下部结构之间用 GYZ450 板式橡胶支座、GYZF4350 聚四氟乙烯滑板支座连接,支座没有与上下结构固定,横向防落梁措施采用混凝土挡块,梁体与挡块之间的空隙为 50 mm。

在数值建模时,把上部结构用线弹性梁柱单元来模拟,墩柱用纤维梁柱单元来表现非线性特性,支座则用平滑动支座单元。用有限元分析方法结合材料本构模型,可以比较准确地展示墩柱损伤、支座滑移的整个过程。

3.2 加固措施效果对比

为了比较各种技术效果,把传统加固以及新型耗能措施进行对比。主要加固技术类别以及特征见表 2,传统加固方法如外包钢板以及混凝土包裹在提高墩柱承载能力方面效果显著,适合一般地震破坏情况,但施工难度较大,新型耗能方法如摩擦摆支座以及三角形钢板耗能挡块在能量消耗以及位移控制方面表现突出,可以有效降低地震响应,综合加固方案通常将传统、新型方法结合使用,达到强度以及耗能之间的平衡。

表 2 桥梁抗震加固技术的分类及特点

技术类别	主要方法	特点	适用性
传统加固	钢套加固、粘贴碳纤维、混凝土外包	施工成熟、经济性好	常规桥梁、低震级区域
新型加固	隔震技术、摩擦摆支座、耗能装置	高效耗能、位移控制显著	高震级区域、特殊桥梁
综合加固	传统与新型技术结合	兼顾性能与经济性	多目标复杂工程
智能化加固	监测+人工智能辅助设计	动态调整、精准加固	长期监控、高性能桥梁

4 结语

桥梁抗震性能评估与加固技术的研究是保障桥梁结构安全的重要方法,本文通过理论分析和实际案例,总结了桥梁抗震评估的核心方法和影响因素,阐明了传统加固技术的局限性及新型技术的应用前景。在实施桥梁抗震加固过程中,施工环境、经济成本和技术复杂性是亟需解决的挑战,而通过合理的方案优化和智能化技术的引入,可以进一步提升加固的效果和效率。

参考文献:

- [1] 黎婷婷,杨根红. 桥梁结构抗震性能评估与加固技术研究[J]. 城市建设理论研究(电子版),2024(36):80-82.
- [2] 程寿山,顾冉星,贾俊峰,等. 基于三角形钢挡块的既有公路桥

梁横向抗震性能提升效能分析[J]. 防灾科技学院学报,2024,26(4):1-13.

- [3] 吕士军. 既有桥梁抗震性能提升关键技术研究[J]. 价值工程,2023,42(22):117-121.
- [4] 苏杨. 既有公路桥梁抗震性能快速评价及加固设防标准研究[D]. 天津:河北工业大学,2023.
- [5] 韩仲禹. 考虑结构损伤的公路桥梁网络抗震韧性评估研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2023.
- [6] 魏晓强,吴登科. 现时期公路桥梁设计及其抗震优化研究[J]. 工程建设与设计,2022(19):139-141.
- [7] 李玲. 兴国至赣县高速公路桥梁结构抗震设计分析[J]. 交通世界,2022(33):117-119.
- [8] 刘振亮,赵存宝,吴云鹏,等. 数据驱动的公路桥梁网络全寿命抗震韧性评估[J]. 吉林大学学报(工学版),2023,53(6):1695-1701.