

高烈度强震区典型公路简支梁合理减隔震体系分析

甘露

[上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200125]

摘要:为研究高烈度强震区高速公路简支梁桥合理减隔震体系,以8度地震区某高速公路典型40 m简支T梁为工程背景,提出了多种减隔震方案,研究了各方案的本构模型,运用非线性时程分析法,对比分析了8度和9度地震下各种减震体系对桥梁关键构件的减震效果。研究表明:E2地震作用下,采用双球面减隔震支座措施时,不能有效控制支座位移,存在落梁的风险;而采用高阻尼橡胶支座可显著降低桥墩、桩基内力,有效控制梁端位移,该方案适用于高烈度地震区高速公路简支梁抗震,研究成果可为近断层高速公路简支梁桥的抗震设防提供技术支撑。

关键词:桥梁工程;简支梁桥;高速公路;高烈度地震区

中图分类号:U442.5

文献标志码:A

文章编号:1009-7716(2021)06-0090-05

0 引言

近年来我国西南山区地震频繁,桥梁作为公路交通网络工程的主要组成部分,在地震灾害中很容易发生损伤破坏,2008年汶川地震中四川省就有6 140多座桥梁受损,2010年玉树地震中青海省就有172座桥梁损毁,2013年芦山地震中四川有440座桥梁损毁,这些震害表明强震作用对桥梁破坏严重,特别是对大量的中、小跨径简支体系桥梁的破坏更是十分普遍。

为防止类似5.12汶川地震、4.20芦山地震、8.03鲁甸地震灾害中大量简支梁桥梁发生特别严重的破坏,影响震后救灾工作,防止次生灾害的发生,急需深入研究适用于高烈度强震区高速公路桥梁合理有效且经济适用的减隔震体系,确保这些最常用的简支梁桥具有优良的抗震性能,对于预防和减轻西南山区桥梁地震灾害有重要的实际价值,也具有迫切的客观工程需要^[1]。

本文以西南山区某8度地震区典型公路简支梁为研究背景,选取4×40 m跨度简支梁桥为研究对象,建立了全桥空间有限元模型,开展了简支梁桥的合理减隔震体系研究;对比分析了多种减隔震措施下桥梁在8度和9度地震作用下的动力响应,对桥梁的抗震性能进行了综合评估,比选出最优的减隔

震体系方案。

1 桥梁减隔震措施及本构模型

1.1 简支梁桥减隔震方案

减震控制技术的应用,不仅可以提高桥梁的抗震性能,还可以节省造价,从某种意义上来说,这是解决实际结构抗震问题最为有效的途径之一。

为了研究9度地震区高速公路简支梁桥合理的减隔震方案,并且考虑经济性、可行性、稳定性等因素,拟开展三种减隔震方案作为9度地震区典型公路简支梁合理减隔震措施比选方案:普通球型支座(方案一,图1(a))、高阻尼橡胶支座(方案二,图1(b))、双曲面减隔震支座(方案三,图1(c))。方案一属于传统桥梁“硬抗型”抗震措施,下文将方案二、三与方案一进行对比,研究适用于9度地震区的减隔震方案。

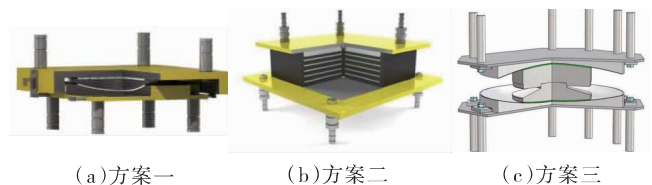


图1 三种支座结构示意图

1.2 球形钢支座本构模型

目前球形钢支座在公路和铁路桥梁结构中应用较为广泛,其承载力强、转动灵活、转角大、耐久性好等优点。它既能够将上部结构荷载均匀的传递给下部结构,又可以利用自身摩擦副实现墩梁的相对平动和转动。依据《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01-2020)^[2],固定球形钢支座采用线弹性刚度模拟,

收稿日期:2020-12-16

作者简介:甘露(1989—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

活动球型钢支座采用双线性立项弹塑性弹簧单元模拟,其本构关系如图 2 所示(F_{cr} 表示屈服力, K_0 表示弹性刚度, K_p 表示屈服后刚度)。

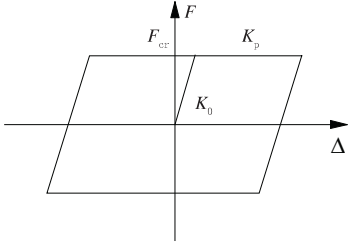
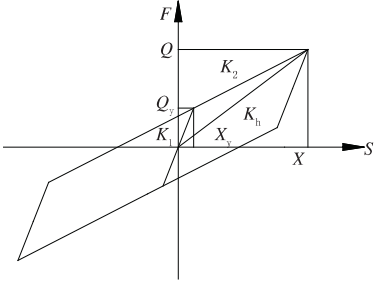


图 2 活动球形钢支座本构模型

1.3 高阻尼橡胶支座本构模型

高阻尼橡胶支座是目前公路桥梁应用较广泛的减震支座,其是高阻尼橡胶与钢板硫化而成,具有较强的阻尼特性,在地震作用下,可较好的耗散地震能量,显著提高桥梁抗震性能。高阻尼橡胶支座即 HDR 支座,根据《公路桥梁高阻尼隔震橡胶支座》(JT/T 842—2012)和《HDR 系列高阻尼隔震橡胶支座》设计指南,采用等效双线性恢复力模型模拟高阻尼橡胶支座的本构关系如图 3 所示。



注: K_1 —初始刚度; K_2 —屈服后的刚度; K_h —等效刚度;
 X_y —屈服水平位移; Q_y —屈服水平剪力; X —最大水平位移; Q —最大水平位移对应的剪力。

图 3 HDR 支座本构模型

1.4 双曲面球型减隔震支座

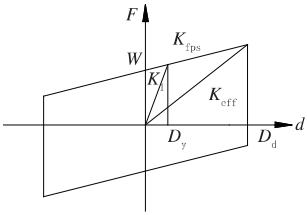
双曲面球型减隔震支座(简称 FPB 支座)减震耗能主要是通过上、下两个平面摩擦副发生相对滑动实现的,在地震作用时,支座销钉将抵抗地震力使支座不发生变形,当地震力大于支座销钉剪断力时,销钉剪断,支座开始发生滑移,两个摩擦副相对摆动滑移,实现地震位移变形和耗散地震能量^[3]。

双曲面摩擦摆支座的本构模型采用摩擦摆支座非线性本构模型进行模拟,可考虑摩擦系数变化对支座摩擦力的影响,其本构关系如图 4 所示。

2 工程实例

2.1 工程概况及有限元模型

以西南 8 度地震区某高速公路典型 4×40 m 简



注: W —竖向荷载; K_i —初始刚度, $K_i = \frac{uW}{D_y}$; D_y —屈服位移; K_{fps} —支座摆动刚度, $K_{fps} = \frac{W}{R}$ 。

图 4 双曲面摩擦摆支座的本构模型

支梁桥为研究对象,上部结构采用 40 m 后张预应力混凝土预制 T 梁,桥梁共分两幅,单幅桥面宽度 12.5 m,下部结构桥墩采用等截面矩形空心墩,截面外轮廓尺寸为 $6.5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$,壁厚 0.6 m,纵筋为 HRB400,截面配筋率 1.42%,桥墩混凝土为 C40,场地特征周期为 0.45 s,1#~5# 桥墩墩高分别为 46.2 m、46.3 m、46.2 m、46.6 m、46.5 m。桩基深度 40 m,桩径为 2 m;场地类型为 II 类,普通球型支座、双球面减隔震支座、高阻尼橡胶支座力学参数分别见表 1、表 2、表 3。

表 1 普通球型钢支座参数表

型号	水平承载力 /kN	摩擦系数	转角 /rad	设计位移 /mm	
				纵向	横向
GQZ-1500ZX	1650	0.04	0.02	150	10

表 2 双曲面球型减隔震支座参数表

P /kN	Q_y /kN	S /mm	K_1 /(kN·mm ⁻¹)	K_{fps} /(kN·mm ⁻¹)	K_{eff} /(kN·mm ⁻¹)	D_d /mm
1 521	90.3	4.7	19.21	0.12	1.4	150

表 3 高阻尼橡胶支座参数表

P /kN	Q_y /kN	S /mm	K_1 /(kN·mm ⁻¹)	K_{fps} /(kN·mm ⁻¹)	K_{eff} /(kN·mm ⁻¹)	D_d /mm
1 521	200	72	8.47	1.3	1.74	856

采用商业 Midas 软件建立全桥模型,主梁和桩基采用梁单元进行模拟,考虑结构自重和二期铺装的质量,桥墩采用纤维单元模拟,桥墩混凝土材料采用 Mander 本构模型,钢筋采用双线性滞回本构模型^[4];各种支座的本构模型按照第 2 节对应模型进行模拟。采用 Midas 软件中的钩和间隙模拟梁与梁之间的碰撞效应,采用弹性刚度模拟桩土作用。全桥有限元模型如图 5 所示。

2.2 地震动输入

根据算例桥所处场地类型,依据《公路桥梁抗震设计规范》(JTG T2231-01—2020)给出的设计反应谱参数曲线,采用数值模拟方法生产 8 度 0.3 g 和 9 度 0.4 g 相应的 E1 和 E2 人工地震波各 7 条,共计

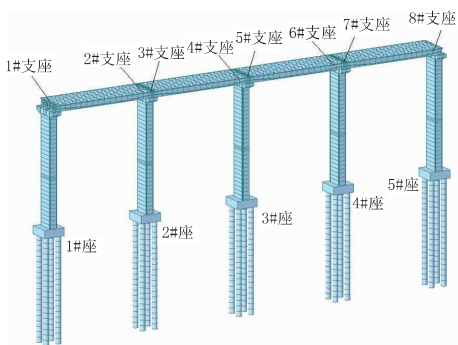
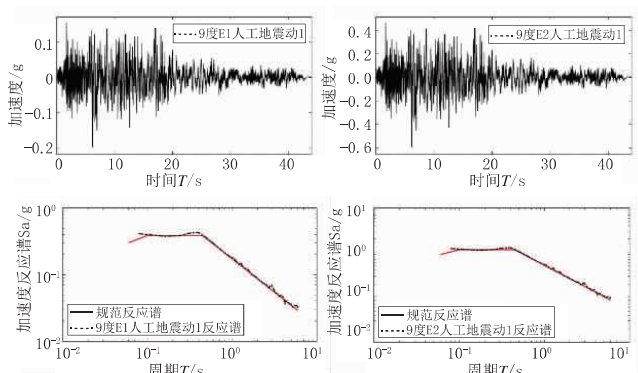


图5 全桥有限元模型示意图

28条,图6给出了部分人工地震波时程曲线以及其对应的反应谱与规范谱对比图。



(a) 9度E1人工波1

(b) 9度E2人工波1

图6 部分人工合成地震波及人工波反应谱与规范谱对比图

2.3 各种减隔震方案下桥梁非线性动力时程响应对比分析

为研究不同减隔震方案对典型高速公路桥梁各关键部位(墩底内力和支座位移)的减震效果,以方案一即传统硬抗模式为计算结果为对比对象,计算其它两种减隔震方案的桥墩墩底内力、支座位移等减震率,分析各种减隔震方案在高烈度地震区的适

用性和可行性。

2.4 各方案桥墩内力对比分析

本文研究4种地震强度下(8度E1、8度E2、9度E1、9度E2)不同减隔震对桥梁结构地震响应的影 响,由于篇幅有限无法将所有计算结果全部给出,这里仅以2#~4#墩为分析对象,图7给出了顺桥向地震作用下各种减隔震方案对应的4种地震水准下的桥墩墩底弯矩计算结果柱状图。

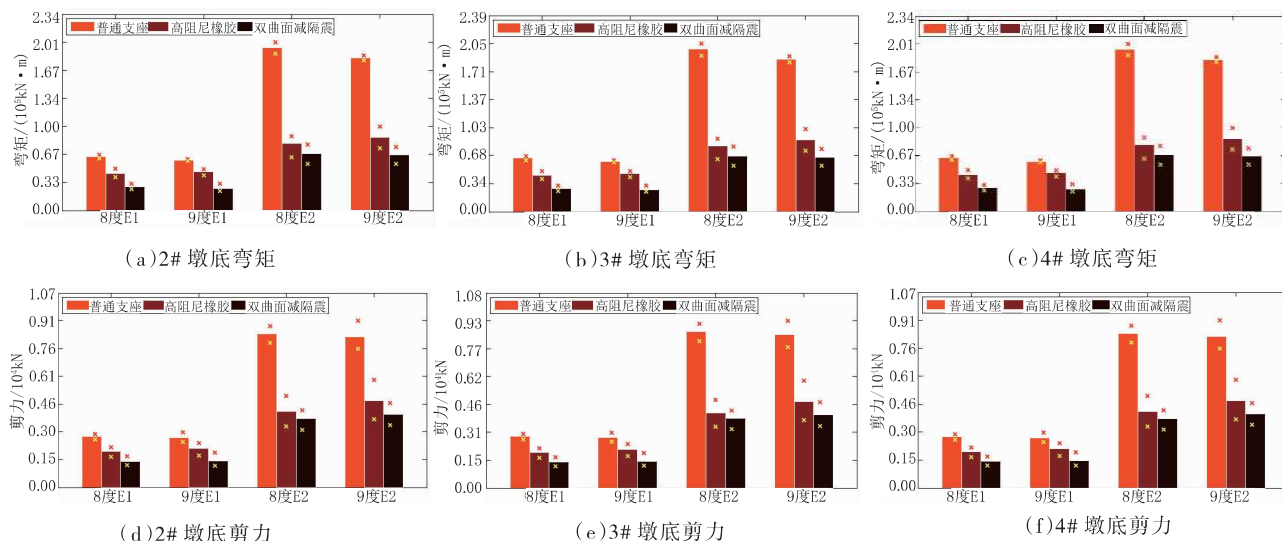
如图7所示,采用双曲面减隔震支座方案相比其它两种方案其墩底弯矩和剪力均最小,普通球型钢支座方案墩底弯矩和剪力最大,但在8度E1和9度E1地震下,三种方案墩底弯矩和剪力相差不大,而在8度E2和9度E2作用下,双曲面减隔震支座与高阻尼橡胶支座两种方案下墩底弯矩和剪力显著低于普通球型支座方案,这两种支座的减震效果显著,其在E2地震作用下,双曲面减隔震支座与高阻尼橡胶支座的墩底内力计算结果相差较小。此外由7条地震波最大最小内力分析表明,对于三种方案在7条E2地震作用下墩底弯矩地震响应相差较小,而墩底剪力波动较大。

综上所述,方案二和方案三在强震作用下可以有效降低墩底内力,减震效果明显,两种方案效果差异不大。

2.5 各方案桥墩内力减震率对比分析

为了进一步分析减隔震方案的减震效果,图8给出了顺桥向地震作用下各种减隔震方案墩底内力平均减震率柱状图。如图8(a)~(c)所示。

(1)FPB支座方案相对普通支座设计方案,2#、



注:图中柱状图上部小叉点表示7条地震动计算结果的最大值,柱状图内部小叉点表示7条地震动计算结果的最小值。

图7 顺桥向地震作用下各种减隔震方案对应墩底平均内力响应分析柱状图

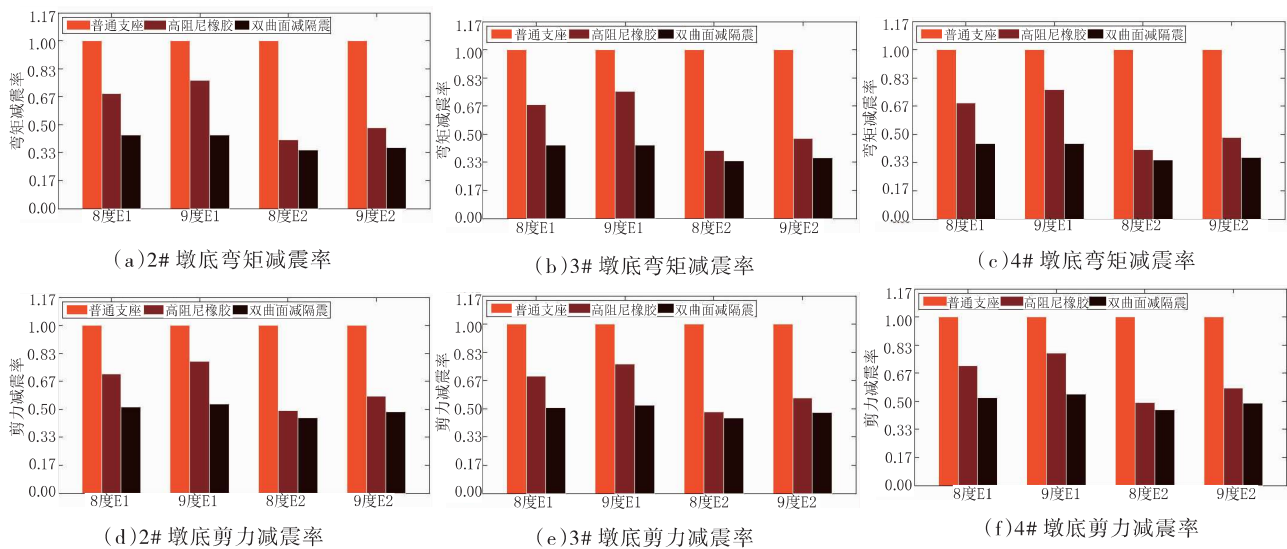


图8 顺桥向地震作用下各种减隔震方案墩底内力平均减震率柱状图

3#、4#墩身8度E1和9度E1的弯矩平均减震率约为54.2%~55.7%;HDR支座方案相对普通支座设计方案,2#、3#、4#墩身8度E1的弯矩平均减震率约为30.7%~32.3%,2#、3#、4#墩身9度E1的弯矩平均减震率约为23.2%~24.3%;FPB支座减震效果优于HDR支座。

(2)双曲面减隔震支座方案相对普通支座设计方案,2#、3#、4#墩身8度E2和9度E2的弯矩平均减震率约为63.7%~66.2%;高阻尼橡胶支座方案相对普通支座设计方案,2#、3#、4#墩身8度E2的弯矩平均减震率约为59.1%~60.3%,2#、3#、4#墩身9度E2的弯矩平均减震率约为52.2%~53.5%。双曲面减隔震支座方案与高阻尼橡胶支座方案减震效果均较好。E2水准下高阻尼橡胶支座减震效果显著提升,与双曲面减隔震支座的减震效果相接近。

分析图8(d)~(f)可知,桥墩剪力减震率计算结果与桥墩弯矩减震率计算结果及变化规律类似,这里不再详述。

综上所述,对于高烈度地震区典型公路简支梁桥梁,双曲面减隔震支座对桥墩和基础受力减震效果最优,其次是HDR支座,最差为普通球型钢支座。

2.6 各方案支座地震位移对比分析

方案一采用了“传统硬抗”的抗震模式,只要活动支座非限位方向满足滑移位移要求即可,因此不进行非隔震支座的位移验算。而HDR支座和双曲面减隔震支座则需要研究其支座在地震作用下是否满足容许位移。

由于支座数量较多,全部给出计算结果篇幅较大,故本文在各简支梁两端支点处仅选取最中间支

座作为分析对象,支座编号规则:1#桥墩支座编号为1#支座,延桥轴线方向依次编号,共计8个支座,如图5所示。图9分别给出了E1和E2地震作用下方案二和方案三对应的支座地震位移对比结果。

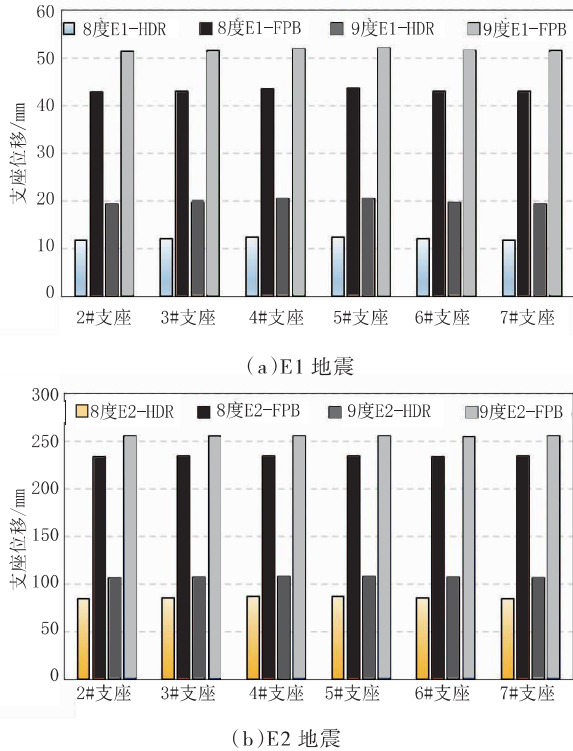


图9 强震作用下支座最大位移分析柱状图

(1)在E1水准地震作用下,采用HDR支座和FPB支座时,各支座顺桥向计算位移小于支座本身的容许地震位移,支座满足设计要求。FPB支座的地震位移均大于HDR支座的地震位移,说明HDR耗散地震能量的效果优于FPB支座。

(2)当采用FPB支座时,E2地震下各支座顺桥向计算位移远大于支座本身的容许地震位移150 mm,

各支座均不满足设计要求,支座容易发生地震破坏,存在落梁风险。建议桥台和墩顶处增设防落梁装置,防止主梁发生落梁,对于防落梁装置的形式可考虑采用拉索式防落梁装置、金属减震卡榫等措施。

(3)当采用 HDR 支座时,E2 地震下各支座顺桥向计算位移小于 HDR 支座的容许地震位移,且有较大富裕,支座满足设计要求。

综合比较桥墩、支座在地震作用下的地震响应结果,建议在高烈度强震区公路简支梁采用高阻尼橡胶支座方案做为典型公路简支梁桥的减隔震体系,可以适当增加防落梁措施,保证桥梁不发生落梁震害。

3 结 论

(1)在 8 度或 9 度强震作用下,采用双曲面减隔震支座方案时,能够降低墩底内力,减少桥墩地震损伤,在 8 度和 9 度对应 E1 地震下墩底弯矩减震率可达 54.2%~55.7%,在 8 度和 9 度对应 E2 地震下墩底弯矩减震率可达 63.7%~66.2%,减震效果显著,但此时双曲面减隔震支座的支座地震位移远超自身容许位移,易出现落梁震害,建议采取限位措施与双

曲面减隔震支座配合使用,限制上部结构发生较严重的相对变形。

(2)在 8 度或 9 度强震作用下,采用高阻尼橡胶支座方案时,均可有效的降低墩底内力,8 度 E2 地震下弯矩减震率达到 59.1%~60.3%,9 度 E2 地震下弯矩减震率达到 52.2%~53.5%;并且在 E2 地震作用下,高阻尼橡胶支座地震位移小于支座容许位移,且有较大富裕量,满足设计要求。

(3)综合考虑各种减隔震措施的经济性、适用性、可靠性,建议采用高阻尼橡胶支座为 9 度强震区典型公路 40 m 跨简支梁桥的减隔震体系。

参考文献:

- [1] 石岩,王东升,韩建平,等.桥梁减隔震技术的应用现状与发展趋势[J].地震工程与工程振动,2017(5):118-128
- [2] JTG/T 2231-01-2020,公路桥梁抗震设计规范[S].
- [3] Providakis C P. Effect of Supplemental Damping on LRB and FPS Seismic Isolators under Near-fault Ground Motions[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2009(1):80-90.
- [4] 张宏远.潮白河大桥的结构体系与消能减震分析[J].城市道桥与防洪,2009(8):55-58.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com