

基于刚度比的简支梁桥减隔震适用范围研究

张西丁

(广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510507)

摘要:以简支梁桥为研究对象,利用有限元软件 MIDAS/Civil 对结构减隔震设计的合理适用范围进行研究。通过对不同墩高的结构进行地震时程分析,得出减震率和刚度比(减隔震支座刚度与桥墩刚度之比)成线性关系,刚度比越大,减震率越小;基于刚度比模型,分析烈度和场地类别等因素对减震率的影响。结果表明,刚度比可作为判断结构减震率的重要指标,刚度比为 3~4 时,结构的减震率下降到 20%,减隔震设计变得不合理;刚度比小于 2 时,烈度越大,减震率越高,刚度比大于 2 时,烈度越大,减震率越小;Ⅱ类场地下不宜采用减隔震设计,刚度比小于 2 时,地质越差,减震率越大,刚度比大于 2 时,地质越差,减震率越小。

关键词:桥梁;简支梁桥;刚度比;减震率;烈度;场地类别

中图分类号:U442.5

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2021)06-0122-05

中国已建和在建桥梁以中小跨径钢筋砼或预应力砼梁桥为主,下部结构通常采用桩柱式轻型桥墩。这类桥梁通常采用延性设计和减隔震设计 2 种抗震体系。延性设计通过利用桥梁墩柱发生塑性变形延长结构周期,耗散地震能量,缺点是震后桥墩发生塑性变形不易修复;减隔震设计利用桥梁上、下部结构的连接构件(支座、耗能装置)发生塑性变形或增大阻尼延长结构周期,耗散地震能量,减小结构地震反应,桥墩保持在弹性范围,震后通过更换减隔震支座即可恢复正常使用。因此,减隔震体系被越来越多地应用到抗震设计中。陈光等研究了不同墩高下减隔震支座对桥梁地震反应的影响,发现随着墩高的增加,减隔震体系周期增加,延长周期和减隔震效果不明显,建议在墩高较大时谨慎对待。魏思斯对 40 m 连续 T 梁桥在不同墩高下桥墩地震工况的内力、位移响应进行研究,发现墩高不超过 20 m 且采用圆形双柱墩时,铅芯隔震橡胶支座能大幅降低桥墩的地震响应;墩高大于 20 m 但不超过 40 m 且采用矩形双柱墩时,铅芯隔震橡胶支座能一定程度降低桥墩的地震响应,减隔震效果随着墩高增加而降低,减隔震支座适用于桥墩高不超过 40 m 的连续梁桥。刘丹以多跨连续梁为依托,研究了铅芯橡胶支座参数对纵横向减震率的影响。上述研究均以单指标为研究对象,没有把支座刚度和桥墩刚度结合起来研究,且针对简支梁桥减隔震合理使用范围的研究不多。该文以桥梁设计中常用的 30 m 简支梁桥为背景,利用有限元软件 MIDAS/Civil 建立计算模

型,分析减震率与刚度比的关系,并对它们的影响因素进行分析,探讨减隔震设计的合理应用范围。

1 工程概况及有限元建模

1.1 工程概况

某路基宽度为 26 m 的高速公路,桥梁采用 2×12.75 m 分幅布置,单幅桥面净宽 12.5 m。上部结构采用多联 3×30 m 先简支后桥面连续预制小箱梁结构,梁高 1.6 m,下部结构采用直径 140~160 cm 桩柱式桥墩(见图 1)。

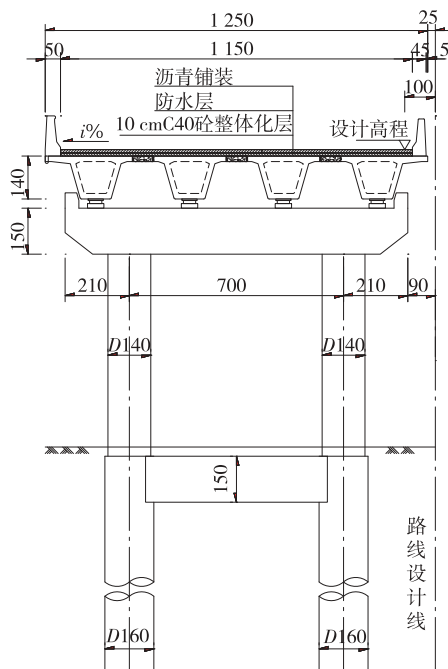


图 1 桥梁横断面图(单位:cm)

该高速公路桥址区场地土为软弱土~坚硬土,场地类别为Ⅲ类,抗震设防烈度为Ⅶ度,基本地震加速度为 $0.10g$,反应谱特征周期为 0.45 s 。桥梁采用减隔震体系,支座选用高阻尼橡胶支座,型号为 $\text{HDR}(\text{I})-520\times 181-\text{G}0.8-\text{e}80$,每片小箱梁两端各布置一个支座。

1.2 有限元模型建立

根据文献[2],高阻尼支座的恢复力模型可采用双线性模拟,其恢复力模型见图 2。由文献[3]查出支座的设计参数,在 MIDAS/Civil 中用双线性弹塑性单元模拟高阻尼支座。采用一般弹性支承(6 个方向的刚度)模拟桩土相互作用,按照 m 法计算桩土水平刚度, m 取值见文献[7],并考虑 2.5 倍动力放大系数。考虑到相邻结构对边界条件的影响,建立三联桥梁结构,选取中间一联结果作为研究对象。桥梁有限元模型见图 3。

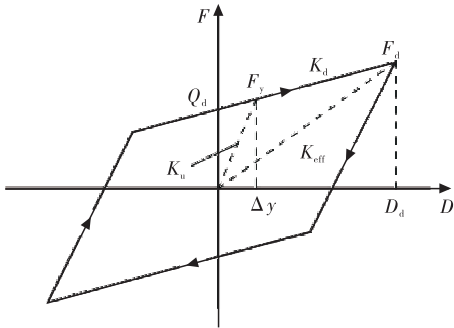


图 2 高阻尼支座的恢复力模型

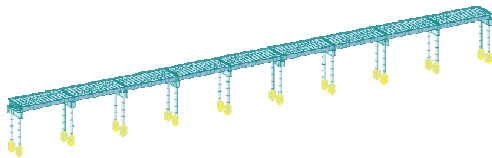


图 3 桥梁有限元模型

1.3 地震波的选择

在结构地震反应时程分析中,地震波的选择非常重要。选择地震波时,应考虑地震动三要素,即地震动强度、地震动频谱特性、地震动持续时间。根据该桥地震烈度和场地土类别,以 3 条模拟人工波作为时程分析的地震动输入(见图 4),时程分析结果取 3 条地震波对应结果的最大值。

1.4 支座参数

为分析高阻尼橡胶支座的减震效果,将这类桥梁常用的板式橡胶支座形式作为对照,通过比较它们在相同地震作用下的响应分析减隔震支座的减震效果,分析减隔震设计的合理适用范围。支座参数

见表 1~2。

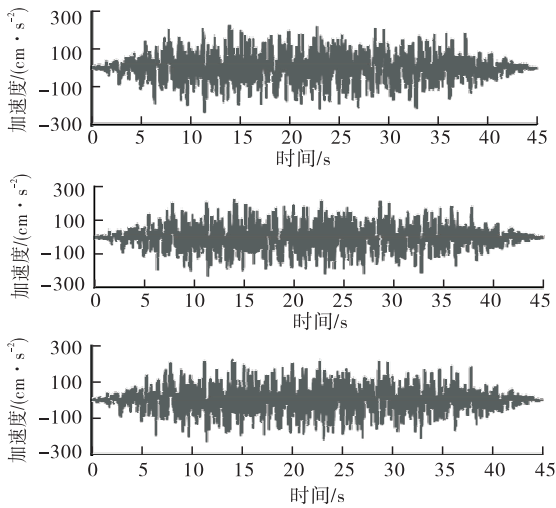


图 4 E2 地震波时程曲线

表 1 高阻尼橡胶支座参数

项目	参数值
支座型号	$\text{HDR}(\text{I})470\times 185-\text{G}0.8$
平面尺寸/mm	$D470$
竖向承载力/kN	1 848
支座总高/mm	185
竖向刚度/($\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$)	616
屈服前刚度/($\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$)	7.6
屈服后刚度/($\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$)	1.17
水平等效刚度/($\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$)	1.56

表 2 板式橡胶支座参数

项目	参数值
支座型号	$\text{GJZ}350\times 550\times 99$
平面尺寸/mm	350×550
竖向承载力/kN	1 836
支座总高/mm	99
橡胶层厚度/mm	66
竖向刚度/($\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$)	1 351.0
水平刚度/($\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$)	3.338

2 减隔震效率分析

2.1 刚度比的影响

减隔震设计通过增大阻尼延长结构周期来耗散地震能量,减小结构地震反应。墩高增大时,结构刚度减小,周期变大,通过延长周期的效果变得不明显。可见,减隔震效率和下部结构刚度密切相关。

为研究桥墩刚度对高阻尼橡胶支座减隔震效果的影响,结合文献[5]的研究成果,选取墩高分别为 5、10、15、20、25 m 共 5 种工况进行时程分析,仅研究等高桥梁的结果,不考虑同一联中墩高差异对结

果的影响。各工况墩高的取值及对应桥墩结构形式见表3。

表3 等高简支梁各工况墩高布置

工况	墩柱高度/m	结构形式	柱径/m	桩径/m
工况1~2	5、10	圆形双柱墩	1.4	1.6
工况3~4	15、20	圆形双柱墩	1.6	1.8
工况5	25	圆形双柱墩	1.8	2.0

以结构在减隔震支座和板式支座下的地震响应(墩顶位移和墩底弯矩)为研究对象,分析采用减隔震支座后的减震效率。定义减震率 Δ 为:

$$\Delta = \frac{|S_1 - S_2|}{S_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: S_1 、 S_2 分别为减震前结构(采用板式橡胶支

座)、减震后结构(采用高阻尼橡胶支座)的效应值。

减震前后结构的地震响应见表4~5。从表4~5可看出:采用墩顶位移和墩底弯矩计算得到的减震率相同,墩高越大,纵桥向和横桥向的减震率越小,说明墩径增大带来的结构响应的减小值小于墩高增大带来的结构响应的增大值;墩高越大,结构越柔,地震响应越大,说明减震率与下部结构刚度密切相关;纵桥向减震率下降速度比横桥向快,墩高为20 m时,纵桥向减震率仅为17%,这时采用减隔震设计已不合理,采用减隔震设计的最小减震率应为20%。鉴于墩柱为圆柱,纵向地震响应大于横向地震响应,下面仅研究墩高小于20 m的纵桥向减震率和下部结构刚度的关系。

表4 纵桥向减震前后效应对比

工况	墩高/ m	板式支座效应值 S_1		高阻尼支座效应值 S_2		减震率 $\Delta/\%$	
		墩顶位移/mm	墩底弯矩/(kN·m)	墩顶位移/mm	墩底弯矩/(kN·m)	墩顶位移	墩底弯矩
工况1	5	73.5	6 220	45.8	3 872	37.7	37.7
工况2	10	162.7	8 378	106.4	5 442	34.6	35.0
工况3	15	219.3	11 334	160.4	8 272	26.9	27.0
工况4	20	302.2	10 941	250.0	9 048	17.3	17.3
工况5	25	305.3	12 357	266.6	10 917	12.7	11.7

表5 横桥向减震前后效应对比

工况	墩高/ m	板式支座效应值 S_1		高阻尼支座效应值 S_2		减震率 $\Delta/\%$	
		墩顶位移/mm	墩底弯矩/(kN·m)	墩顶位移/mm	墩底弯矩/(kN·m)	墩顶位移	墩底弯矩
工况1	5	22.1	5 420	10.3	2 569	53.4	52.6
工况2	10	55.7	7 201	29.1	3 762	47.8	47.8
工况3	15	82.0	9 690	46.4	5 510	43.4	43.1
工况4	20	133.1	10 600	74.9	5 975	43.7	43.6
工况5	25	149.3	12 360	91.7	7 559	38.6	38.8

2.2 减震率和刚度比的关系

上文仅计算了5种墩高、3种墩柱尺寸的情况。为使结果更具普遍性,建立墩高在20 m以下的多个模型,分析减震率与墩柱刚度、减隔震支座刚度的关系。定义刚度比为式(2),墩柱刚度为排架墩刚度,支座刚度为一个墩位处所有支座等效刚度之和,由减隔震设计下支座位移按式(3)计算得到。各工况下墩高布置见表6。

$$\mu = \frac{\sum K_{\text{eff}}}{K_p} \quad (2)$$

$$K_{\text{eff}} = \frac{Q_{d,i}}{d_i} + K_{d,i} \quad (3)$$

式中: K_{eff} 为单个支座等效刚度; K_p 为墩柱刚度; d_i 、 $Q_{d,i}$ 、 $K_{d,i}$ 分别为减隔震支座位移、特征强度、屈

服后刚度。

表6 各工况下墩高布置

工况	墩柱高度/m	结构形式	柱径/m	桩径/m
工况1~5	3、5、8、10、12	圆形双柱墩	1.4	1.6
工况6~7	15、18	圆形双柱墩	1.6	1.8

各工况下减震率和刚度比的关系见图5。从图5可看出:刚度比越大,减震率越小;刚度比小于1时,数据点较离散;刚度比大于1时,数据点基本分布在直线附近。将这些数据点拟合成式(4),相关系数接近0.9,相关度较高。说明减震率和刚度比成线性负相关,刚度比越大,减震率越小。刚度比大于4时,减震率小于20%,不宜采用减隔震设计。

$$\Delta = -0.064\mu + 0.454 \quad (4)$$

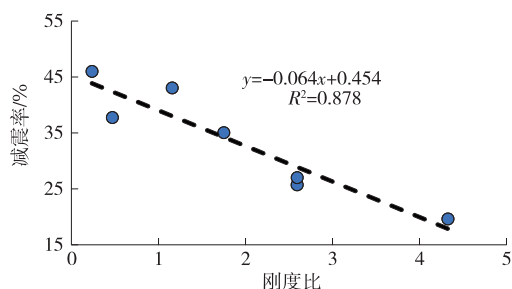


图5 减震率和刚度比的关系曲线

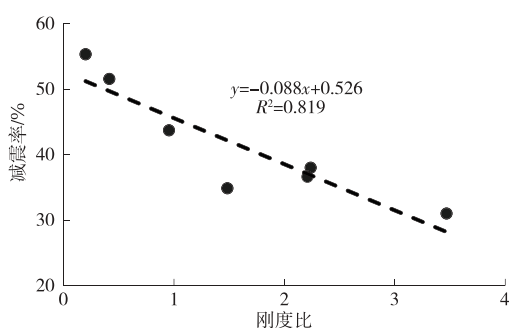


图8 减震率和刚度比的关系曲线[地震烈度8度(0.3g)]

3 减震率的影响因素分析

前文得出了减震率和刚度比的负相关属性,为验证它们之间关系的适用性,分析地震烈度和场地类别等因素的影响。

3.1 地震烈度的影响

地震烈度不同,地震的峰值加速度不同。保持场地类别不变,改变地震烈度,计算结构在7度(0.15g)、8度(0.2g)和8度(0.3g)3种工况下的地震响应,分析减震率和刚度比的关系。计算中不考虑支座破坏等因素,仅研究结构的地震响应结果。计算结果见图6~9。

从图6~9可看出:不同地震烈度下,减隔震和刚度比基本成线性关系,刚度比越大,减震率越小;除8度工况外,烈度越大,曲线的斜率越大;刚度比

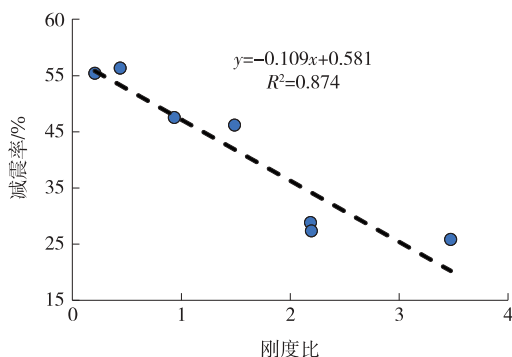


图6 减震率和刚度比的关系曲线[地震烈度7度(0.15g)]

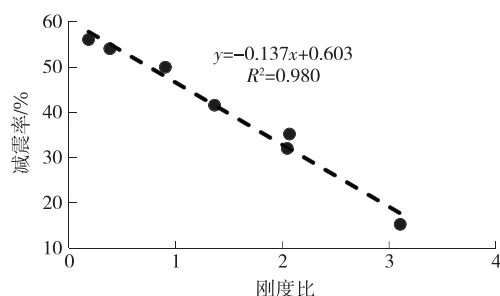


图7 减震率和刚度比的关系曲线[地震烈度8度(0.2g)]

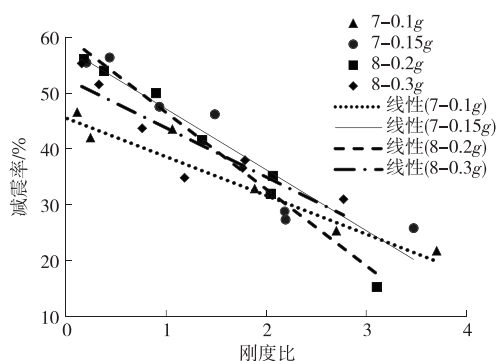


图9 不同烈度下的减震率曲线

小于2时,烈度越大,减震率越高;刚度比大于2时,烈度越大,减震率越小。若以减震率20%来控制,刚度比大于3~4时不宜采用减隔震设计。

3.2 场地类别的影响

桥位处的分区特征周期为0.45s,改变场地类别,分别计算在Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ类场地下的地震响应,分析减震率和刚度比的关系。Ⅲ类场地的结果前文已列举,不再赘述,图10、图11分别为Ⅱ类和Ⅳ类场地的计算结果。从图10、图11可看出:Ⅱ、Ⅳ类场地工况下,减震率和刚度成线性负相关,刚度比越大,减震率越小;Ⅱ类场地工况下,结构整体减震率较低,最高约为35%,说明减隔震设计的效果在地质良好的情况下得不到有效发挥;Ⅳ类场地工况下,结构整体减震率较高,最高约为50%,减震率和刚度比的线性相关系数较高。

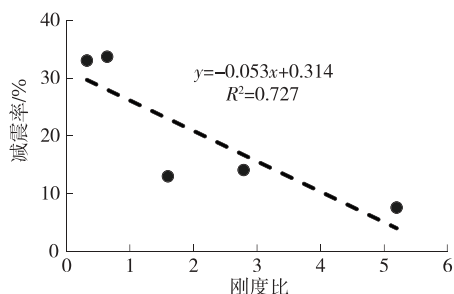


图10 减震率和刚度比的关系曲线(Ⅱ类场地)

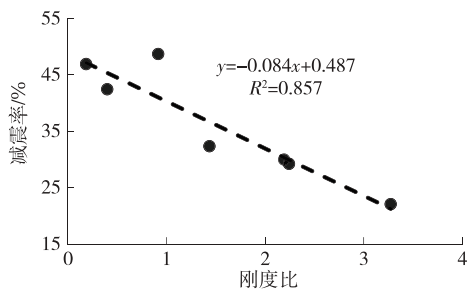


图 11 减震率和刚度比的关系曲线(Ⅳ类场地)

3种场地工况下减震率和刚度比关系的对比见图 12。

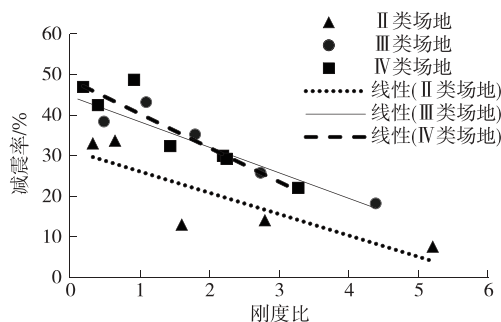


图 12 不同场地类别下减震率和刚度比关系曲线

从图 12 可看出:Ⅱ类场地工况下减震率小于其他 2 种工况,说明在地质良好的情况下不宜采用减隔震设计。Ⅳ类场地工况下曲线斜率高于Ⅲ类场地工况,说明刚度比较小时,地质越差,减震率越大;刚度比较大时,地质越差,减震率越小。刚度比等于 4 时,减震率约为 20%,说明减隔震设计适用于刚度比小于 4 的结构。

4 结论

通过对采用板式橡胶支座和减隔震支座的简支桥梁进行地震波时程分析,得出简支桥梁减震率和刚度比的关系,并考虑不同因素对它们关系的影响,

得出以下结论:

(1) 减震率和刚度比成线性关系,刚度比越大,减震率越小。刚度比可作为判断结构减震率的重要指标,刚度比大于 3~4 时,结构的减震率将小于 20%,此时不宜采用减隔震设计。

(2) 刚度比小于 2 时,烈度越大,减震率越大;刚度比大于 2 时,烈度越大,减震率越小。

(3) Ⅱ类场地下不宜采用减隔震设计。刚度比小于 2 时,地质越差,减震率越大;刚度比大于 2 时,地质越差,减震率越小。

参考文献:

- [1] 张西丁.桩柱式桥墩的减隔震抗震性能研究[J].交通科技,2019(5):74-77.
- [2] 招商局重庆交通科研设计院有限公司.公路桥梁抗震设计规范:JTG/T 2231-01-2020[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.
- [3] 中交第一公路勘察设计研究院有限公司.公路桥梁高阻尼隔震橡胶支座:JT/T 842-2012[S].北京:人民交通出版社,2013.
- [4] 陈光,王晓伟,叶爱君.减隔震支座对不同墩高桥梁地震反应的影响[J].结构工程师,2015,31(3):128-134.
- [5] 魏思斯.减隔震支座在连续梁桥中的合理适用范围研究[J].公路交通技术,2015(6):32-37.
- [6] 刘丹.等截面多跨连续梁桥减隔震技术研究[D].长沙:中南大学,2012.
- [7] 中交公路规划设计院有限公司.公路桥涵地基与基础设计规范:JTG 3363-2019[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.
- [8] 刘新华,李加武,周琴,等.简支梁桥铅芯橡胶支座减震特性研究[J].建筑科学与工程学报,2014,31(3):124-131.

收稿日期:2021-02-23

(上接第 118 页)

的方案进行改扩建。

参考文献:

- [1] 国家发展改革委.长江干线过江通道布局规划(2020—2035 年):发改基础[2020]512 号[A].北京:国家发展改革委,2020.
- [2] 苏交科集团股份有限公司.沪武高速公路太仓至常州段扩建工程可行性研究报告[R].南京:苏交科集团股份有限公司,2018.

- [3] 晏杉,南爱强.TransCAD 软件在公路建设项目交通量分析与预测中的应用[J].中外公路,2011,31(4):273-276.
- [4] 周荣贵,钟连德.公路通行能力手册[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.
- [5] 中交第一公路勘察设计研究院有限公司.公路路线设计规范:JTG D20-2017[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.

收稿日期:2021-02-25