

杨华平,钱永久,樊启武,等.大跨铁路钢桁连续梁桥减隔震方案比较研究[J].地震工程学报,2017,39(6):1097-1104.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.06.1097

YANG Huaping, QIAN Yongjiu, FAN Qiwu, et al. Comparative Study on Seismic Mitigation and Isolation Schemes for a Long-span Railway Steel Truss Continuous Beam Bridge[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(6): 1097-1104. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.06.1097

大跨铁路钢桁连续梁桥减隔震方案比较研究^①

杨华平¹, 钱永久¹, 樊启武², 黎 璟¹, 邵长江¹

(1. 西南交通大学土木学院, 四川 成都 610031; 2. 中铁二院集团公司, 四川 成都 610031)

摘要:为研究适用于大跨铁路钢桁连续梁桥的减隔震方案及合理优化参数,以一座全长 504 m 的三跨铁路钢桁连续梁特大桥为工程背景,使用非线性结构分析软件 SAP2000 建立有限元模型,采用快速非线性分析方法分析对比摩擦摆、阻尼器、速度锁定器等减隔震方案在各种装置参数下的减震效率。研究表明:由于大跨铁路钢桁连续梁桥墩身自振导致的地震力较大,摩擦摆方案内力减震效率一般,同时墩底内力对滑动面半径变化并不敏感,在选取滑动半径时应更多地考虑行车平顺性和梁端位移值的限制。速度锁定器会极大地增加此类桥梁地震输入能量,不适用于此类桥型。阻尼器方案对活动墩内力减震效果明显,但不能有效降低固定墩内力。摩擦摆支座附加阻尼器组合减震方案能有效控制此类桥梁的内力和位移响应。研究结论可为大跨度钢桁连续梁桥减隔震设计提供参考。

关键词:地震分析;钢桁桥;连续梁桥;减隔震;摩擦摆;阻尼器;速度锁定器

中图分类号: U448.13; U442.5⁺5

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2017)06-1097-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.06.1097

Comparative Study on Seismic Mitigation and Isolation Schemes for a Long-span Railway Steel Truss Continuous Beam Bridge

YANG Huaping¹, QIAN Yongjiu¹, FAN Qiwu², LI Jing¹, SHAO Changjiang¹

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: To investigate appropriate seismic mitigation and isolation schemes and rational optimal parameters for long-span railway steel truss continuous beam bridges, based on a three-span railway steel truss continuous beam bridge with a total length of 504 m, a finite element model was built with the non-linear finite element analysis program SAP2000. The damping efficiencies of different seismic mitigation and isolation devices, such as the friction pendulum, lock-up device, and damper, were compared by the fast non-linear analysis method. The results showed that, since the natural vibration of bridge piers may cause significant earthquake force, the scheme with

① 收稿日期:2016-08-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51178395);中国工程院咨询研究项目:交通基础设施重大结构安全保障战略研究(2015-05-ZD-002)

作者简介:杨华平(1989-),男,博士研究生,研究方向:桥梁抗震。E-mail:hpbridge@163.com。

a friction pendulum system does not show high efficiency. The lock-up device will greatly increase the seismic input energy of this kind of bridge, therefore, it is not recommended in this case; the scheme with a damper can significantly reduce the seismic response of piers with movable bearings; however, it cannot effectively reduce the seismic response of piers with a fixed bearing. A combination of the friction pendulum bearing and damper can effectively control the internal forces and the displacement response of this type of bridge. The conclusions can provide valuable reference for the seismic isolation of long-span railway steel truss continuous beam bridges.

Key words: earthquake analysis; steel truss bridge; continuous beam bridge; seismic isolation; friction pendulum; damper; lock-up device

0 引言

近几十年来世界范围内发生的多次强烈地震对交通网络中桥梁结构造成的严重破坏及因桥梁倒塌、抢修不便导致生命线工程中断引起的严重后果,使得桥梁抗震成为当前交通运输领域中的一个研究热点。

传统桥梁抗震设计方法通常采用加大墩柱截面尺寸、增加截面配筋率等方式提升桥梁结构抗震性能。但截面尺寸较大的桥墩不仅会增加造价,影响景观,同时也会增加结构刚度,增大地震响应。如何平衡变形和地震力的矛盾,是传统结构抗震设计的难点。因此采用合适的减、隔震措施提升桥梁结构的抗震性能已成为当前桥梁抗震领域中的一个重要研究方向^[1-8]。

钢桁梁桥因其上部结构质量较轻、跨越能力出色、便于拼装运输等优势,在震区桥梁选型中获得了较为广泛的应用^[9-10]。研究者们针对钢桁梁桥适用的减隔震措施已进行了一定的研究,如 Zayas 等^[11]通过对一座设置了摩擦摆装置的 Benicia-Martinez 桥在罕遇地震下的响应分析指出,设置摩擦摆支座的大跨度上承式公路钢桁梁桥在罕遇地震下其支座能自动复位而无需震后修复;陈兴冲等^[12-13]研究了多种减隔震装置在高墩大跨度铁路简支钢桁梁桥上的应用效果,指出减隔震支座对其具有一定的减震效果,但应注意结构特性与地震动频谱特性,且合理的阻尼器方案能明显降低其地震响应;张常勇等^[14]与王志英等^[15]分析了多种减隔震措施对一座长联大跨公路钢桁梁桥的减震效果,指出摩擦摆装置为此类桥型最佳方案,并给出了最优设计参数;朱开才^[16]研究表明,设置 TMD 装置可有效降低高墩大跨度铁路简支钢桁梁桥的地震响应。

现有钢桁梁桥减隔震研究多集中于钢桁简支梁桥及公路钢桁连续梁桥,研究结论能否适用于振型复杂、下部结构质量相对更大的大跨铁路钢桁连续梁桥尚不明确。故本文以一座全长 504 m 的三跨铁路钢桁连续梁特大桥为工程背景,采用快速非线性分析方法(FNA),分析对比摩擦摆、阻尼器、速度锁定器、阻尼器与摩擦摆组合方案等减隔震方案在多种装置参数下的减震效率,研究各方案的最优设计参数及其在此类桥型上的适用性,以期为大跨度铁路钢桁连续梁桥减隔震设计提供参考。

1 工程概况

某铁路特大桥全长 504 m,跨度组合为 140 m + 224 m + 140 m,为设计行车速度 250 km/h 的双线客运专线桥梁,线间距 4.6 m。主桥钢桁梁采用 N 型桁架,两片主桁,桁宽 14 m,跨中桁高 16 m,支点桁高 32 m,节间长度 14.0 m。上、下弦杆均采用箱形截面,主桁腹杆采用箱形截面及 H 形截面。桥面采用纵横梁结构体系,每一线铁路下方设两道纵梁,间距 2.0 m,沿桥纵向每一节点处设 1 道横梁,纵梁全桥连续,遇横梁时与横梁栓焊连接,钢桁梁及桥面纵横梁均采用 Q345 钢材制造。主桥 17、18 号桥墩采用圆端形实体墩,墩顶纵、横向宽度分别为 7 m 和 16.6 m,墩身和承台桩基均采用 C35 混凝土。原设计方案在 17 号桥墩上设置纵向固定支座,18 号桥墩和边墩纵向均可活动,同时各主墩横向均设置固定支座。桥型布置如图 1 所示。

2 结构振动特性

2.1 设计方案结构有限元模型

采用非线性结构分析软件 SAP2000 建立了该桥的有限元分析模型,如图 2 所示。

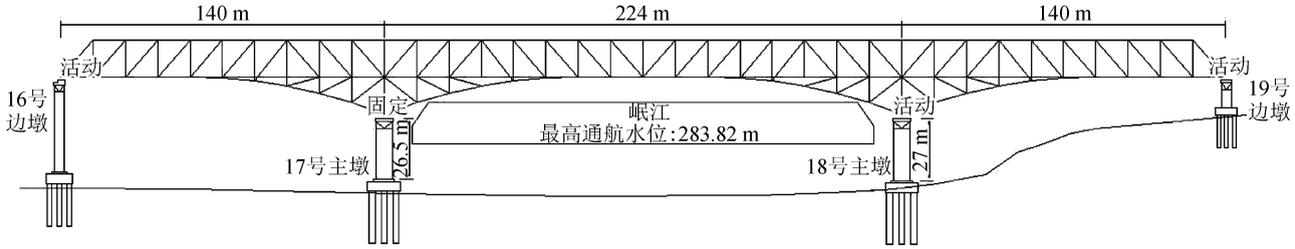


图 1 桥型布置图

Fig.1 Layout of the bridge

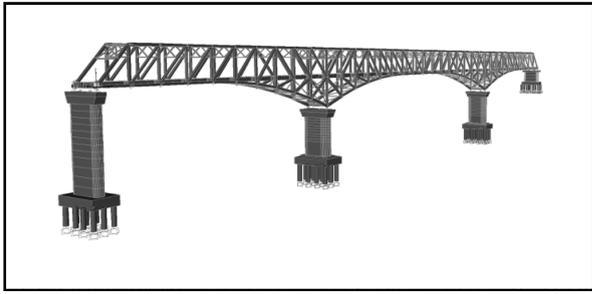


图 2 有限元模型

Fig.2 Finite element model

有限元模型中主梁钢桁结构和桥面系纵横梁与桥墩及承台桩基等下部结构都采用三维空间梁单元进行模拟。桥面板不计刚度,通过换算为等效荷载与等效质量加入模型。本桥为生命线工程中的关键节点,不考虑在强震下进入强非线性工作,故上下部结构材料本构均为弹性。其中 C35 混凝土材料弹性模量设定为 3.15×10^4 MPa,泊松比为 0.2。Q345 钢材弹性模量设定为 2.0×10^5 MPa,泊松比为 0.3。原设计方案固定与活动普通支座均采用弹性连接模拟,各自由度方向刚度值按是否约束取 1×10^7 kN/m和 0。各减隔震方案中装置采用与其力学本构相对应的非线性力学单元模拟。本桥地质条件较好,桩土效应未详细考虑,直接取桩基三倍直径长度在底部固结^[17]。

2.2 桥梁结构动力特性

采用子空间迭代法对该桥振动特性进行分析研究。模态分析结果表明,该桥振型密集复杂,且低阶振型多为上部结构自振,结构质量参与系数较低,前 20 阶振型纵向质量参与系数仅为 58.5%。18 号墩墩身自振出现在第 22 阶(纵桥向质量参与系数 15.8%),振动周期为 0.405 s,前 22 阶振型纵向质量参与系数提升到了 74.3%。表 1 列出了该桥前十阶振型的振动形式及周期。

2.3 地震响场地特性及分析用地震动时程

桥址处为Ⅶ度区,场地特性周期为 0.4 s。罕遇

表 1 前 10 阶振型特性表

Table 1 Characteristics of the first ten vibration modes

振型阶数	周期/s	振动形式
1	2.375	主梁对称横弯
2	1.828	全桥纵飘
3	1.499	边跨横弯
4	1.479	边跨横弯
5	1.185	主梁竖弯
6	1.089	主梁反对称横弯
7	0.786	主梁反对称竖弯
8	0.769	主梁横弯+扭转
9	0.763	边墩纵弯
10	0.690	主梁对称竖弯

地震(50 年超越概率 2%)下设计地震峰值加速度为 $0.21g$ 。依据《铁路工程抗震设计规范》^[18]设计地震加速度放大系数 $\beta(T)$,其表达式如下:

$$\beta(T) = \begin{cases} 1 + \frac{T}{0.1} \times 1.25 & 0 < T < 0.1 \text{ s} \\ 2.25 & 0.1 \text{ s} \leq T < T_g \\ 2.25 \left(\frac{T_g}{T} \right) T_g & T_g \leq T < 5T_g \\ 0.45 & 5T_g \leq T \end{cases} \quad (1)$$

根据规范规定,采用三角级数方法合成拟合三条反应谱与目标反应谱差值在 5%以内的人工地震波用于分析。生成的人工波加速度波形如图 3 所示。

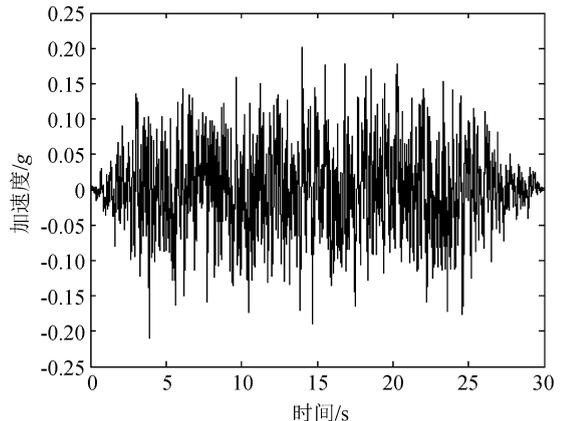


图 3 人工波加速度时程示意图

Fig.3 Acceleration time history of artificial wave

3 减隔震方案及装置设计参数

为明确大跨度铁路钢桁连续梁桥适用的减隔震方案及参数,本文对摩擦摆、阻尼器、速度锁定器和摩擦摆支座附加阻尼器组合等减隔震方案的减震效率进行了分析对比。各方案装置布置、力学模型及装置参数取值范围如下所述。

3.1 摩擦摆方案

为减轻墩柱的 $P-\Delta$ 效应,本方案选用滑动面向下的摩擦单摆支座,其结构如图 4 所示。

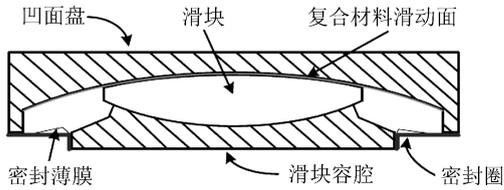


图 4 摩擦单摆支座结构示意图

Fig.4 Structure of the friction pendulum bearing

装置布置方案为在 17 和 18 号墩布设双向摩擦单摆支座,16 和 19 号墩上仍为纵向活动支座。

SAP2000 软件中嵌入了建立考虑动轴力和双向耦合的 FPS 模型^[19],可考虑摩擦摆支座动轴力对支座屈服力和屈服后刚度的影响、支座双向方向回复力和摩擦力的耦合效应以及摩擦系数随速度的变化。为更精确地计算结构地震响应,本文选取该型单元进行摩擦摆支座的建模,并依据市场上可供采购的产品特性,分析对比了慢速滑动摩擦系数为 0.03、快速滑动系数为 0.05、支座半径为 4~10 m 的摩擦摆支座减震效果。

3.2 黏滞阻尼器方案

该方案为在原设计方案基础上,在 18 号墩与主梁间增设两个黏滞阻尼器。该阻尼器由钢质圆柱形缸体、活塞和缸体内注满的黏滞液体或胶泥组成。活塞将缸体分隔成两个腔室,活塞运动时,通过在缸体内壁与活塞之间的间隙或活塞上的导流孔,黏质液体或胶泥从一个腔室流到另一个腔室产生阻尼力并消耗能量。

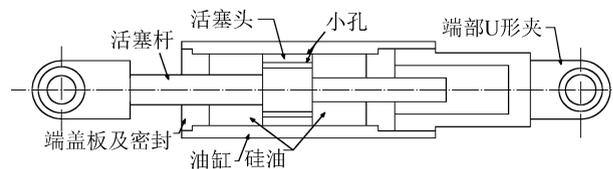


图 5 阻尼器结构示意图

Fig.5 Structure of the damper

阻尼器力学模型可表示为:

$$F = C |v|^a \operatorname{sgn}(v) \quad (5)$$

式中: C 为阻尼常数; v 为活塞运动速度; a 为速度指数。

在有限元模型中,阻尼器采用 Maxwell 非线性力学单元模拟。依据桥梁工程中常采用的阻尼器类型,本文对阻尼常数范围为 1 000~4 000 kN/(m/s)^a、速度指数范围为 0.2~0.9 的阻尼器装置减震效果进行了对比分析。

3.3 速度锁定器力学方案

该方案将 18 号墩上固定支座替换为速度锁定支座。速度锁定装置结构与阻尼器类似,但与黏滞阻尼器不同的是,速度锁定小孔孔径较小,在地震和制动力等突加荷载作用下,液体不能顺利通过小孔,活塞直接压缩腔内液体,速度锁定器表现为大刚度特性。

速度锁定器也可采用 Maxwell 非线性力学单元模拟,与黏滞阻尼器不同的是,速度锁定器速度指数要大得多。采用 Maxwell 非线性力学单元模拟本方案速度锁定器时,阻尼常数 $C=6\ 000\ \text{kN}/(\text{m/s})^2$,速度指数 $a=2$ 。

3.4 摩擦摆支座附加阻尼器组合减震方案

该方案为在 17 和 18 号墩设双向摩擦单摆支座的同时,在主墩上各设置阻尼器。摩擦摆及阻尼器装置力学参数分别根据摩擦摆方案和黏滞阻尼器方案减震效率分析结果选取合理值。

4 减隔震方案减震效率分析

通过对以往震害经验的总结,发现大跨连续梁桥震害的主要表现为墩柱弯曲或剪切破坏及梁端位移不足引起梁体与相邻联梁或桥台碰撞导致的梁体损伤或落梁事故。故墩柱内力及梁端相对位移是连续梁桥地震响应分析的重点关心值。对于仅受水平地震激励的连续梁桥,地震作用过程中轴力变化不大,最不利弯矩峰值出现在墩底且与最大剪力线性相关。故本节使用快速非线性时程分析方法(FNA)对原方案及各减隔震方案进行地震响应分析,以 17、18 号墩墩底弯矩响应峰值及 19 号墩上梁端位移响应峰值作为关键参数,评估各方案的减震效率及其合理性。

4.1 原设计方案地震响应分析结果

以 3 条人工地震波作为激励,对原设计方案地震响应进行计算分析。设计方案 17 和 18 号墩墩底内力峰值响应如表 2 所列,19 号墩上梁端位移响应值列于表 3。

表 2 主墩内力表

Table 2 Internal force of main piers

人工波	17号墩		18号墩	
	剪力/kN	弯矩/kN·m ⁻¹	剪力/kN	弯矩/kN·m ⁻¹
波 1	26 230.4	615 224.4	34 347.3	621 441.2
波 2	25 512.4	584 949.1	30 226.2	583 101.8
波 3	23 804.1	612 531.5	31 487.3	536 657.4

表 3 梁端位移表

Table 3 Displacements at the ends of beam

墩号	波 1 响应峰值	波 2 响应峰值	波 3 响应峰值
	/mm	/mm	/mm
19 号墩	95	90	87

即在罕遇地震下,17号墩最不利弯矩峰值为 615 224.4 kN·m,18号墩最不利弯矩峰值为 621 441.2 kN·m,右侧最不利梁端位移值为 95 mm。

4.2 摩擦摆方案减震效率分析

将摩擦摆滑动摩擦面半径为 4~10 m 时对应的 17、18 号墩在 3 条人工地震波纵向激励下的最不利墩底弯矩和左侧梁端位移分别绘于图 6 和图 7。

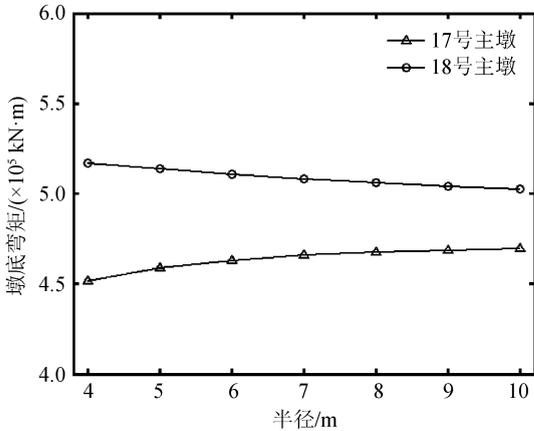


图 6 墩底峰值弯矩图

Fig.6 Peak bending moment at the bottom of piers

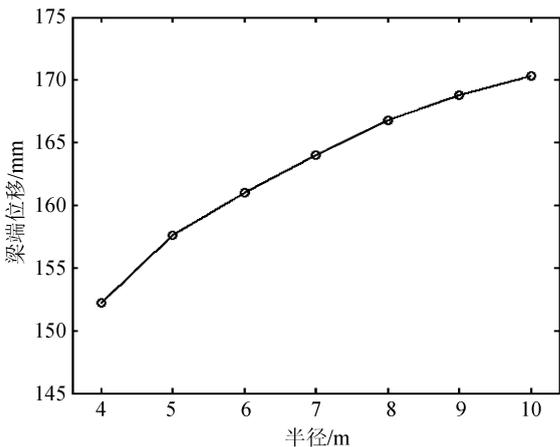


图 7 梁端位移图

Fig.7 Displacements at the ends of beam

由图 7 可以看出,设置摩擦摆后,梁端位移响应值随滑动面半径增大而不断增加。滑动面半径为 4 m 时,17 号主墩墩底弯矩最小,弯矩值为 451 452.55 kN·m,减小到原设计方案的 73.38%。随滑动面半径增大,17 号墩弯矩不断增加,当滑动面半径为 10 m 时,弯矩值为 469 509.80 kN·m,是原设计方案的 76.32%。而 18 号墩墩底弯矩值随滑动面半径增大而减小,当摩擦摆滑动面半径由 4 m 变化为 10 m 时,墩底弯矩由原设计方案值 83.15%降低到 80.86%。

分析结果表明,在 4~10 m 范围内摩擦摆滑动面半径变化对纵向墩底弯矩响应结果影响很小,当半径由 4 m 变化到 10 m 时,墩底弯矩峰值响应变化不到原设计方案值的 3%。

与常规梁桥摩擦摆减隔震方案墩柱内力随摩擦摆滑动面半径增大而减小的经验不同的是,17 号墩墩底弯矩值随滑动面半径增大不断增加。为说明该现象原因,图 8 绘制了滑面半径为 4 m 和 10 m 时 17 号墩上摩擦摆在人工波 1 下的位移-剪力图,可见滑面半径增大时,上部结构传递到墩上的剪力在减小。

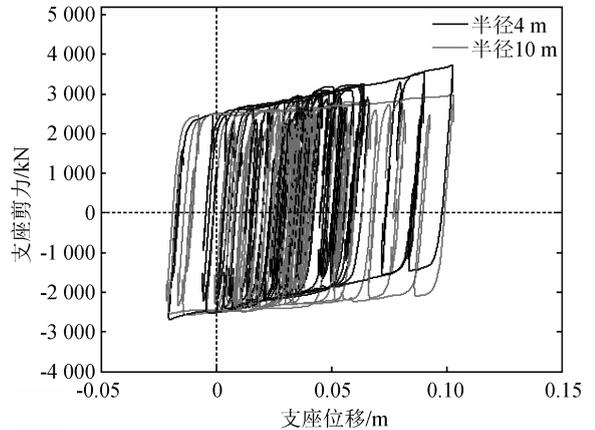


图 8 摩擦摆支座位移-剪力图

Fig.8 Displacement-shear force curve of the friction pendulum bearing

而将 17、18 号墩支座峰值剪力与墩底峰值剪力比值绘制于图 9 中,可见上部结构传下来的剪力峰值不超过墩底剪力峰值的 0.154 倍,此时墩身自振导致的惯性力占桥墩地震内力响应的主要部分。因此当本桥摩擦摆滑动面半径增大时,尽管上部结构传递到墩上的剪力在减小,但总体地震内力响应却会增大。故此类桥型在进行摩擦摆滑动面半径选取时,应更多考虑正常使用时温度等效作用下滑块在滑动面往复运动导致支点处高程变化对行车平顺行的影响及地震作用下梁端位移值的控制,避免与相邻联桥梁或桥台发生碰撞。

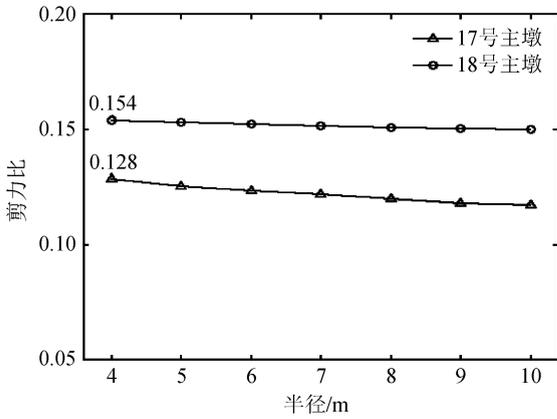


图9 支座/墩底剪力比图

Fig.9 The ratio of shear force of bearing to bottom of pier

4.3 阻尼器方案减震效率分析

各阻尼器参数组合方案下墩底弯矩与右侧梁端位移如图10与11所示。

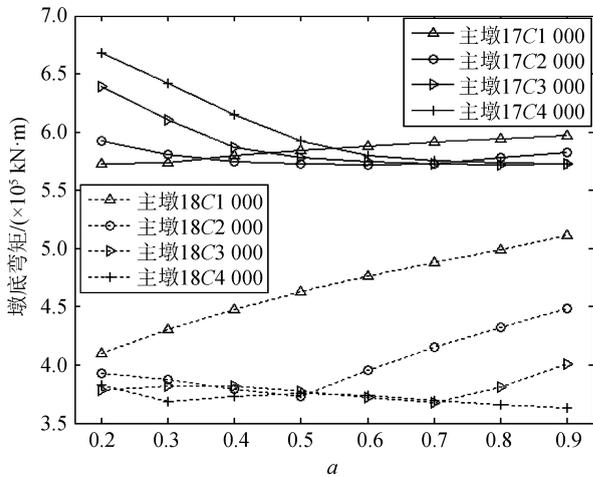


图10 墩底峰值弯矩图

Fig.10 Peak bending moment at the bottom of piers

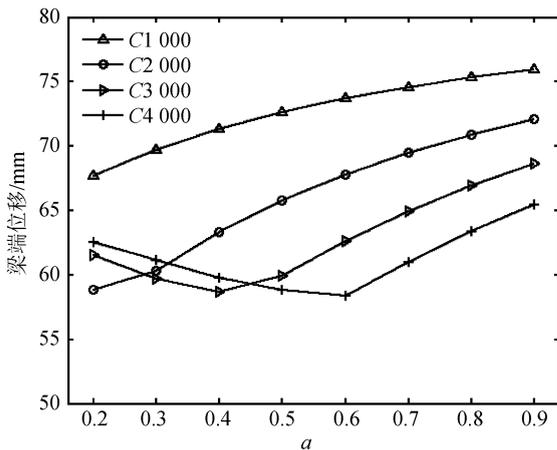


图11 梁端位移图

Fig.11 Displacements at the ends of beam

计算表明,当阻尼器选取 $C = 2\ 000\ \text{kN}/(\text{m}/\text{s})^{0.5}$ 、 $a = 0.5$ 、 $C = 3\ 000\ \text{kN}/(\text{m}/\text{s})^{0.7}$ 、 $a = 0.7$ 及 $C = 4\ 000\ \text{kN}/(\text{m}/\text{s})^{0.9}$ 、 $a = 0.9$ 时,墩底减震效果相对最佳。三种参数组合下,17号和18号桥墩墩底弯矩峰值与原方案比值如表4所列。

表4 内力控制最佳方案与原方案墩底弯矩峰值比值表

Table 4 Ratio of peak bending moment at the bottom of piers of best internal force control scheme to that of original scheme

墩号	$C = 2\ 000$	$C = 3\ 000$	$C = 4\ 000$
	$a = 0.5$	$a = 0.7$	$a = 0.9$
17	93.0%	93.1%	93.1%
18	60.1%	59.2%	58.4%

当阻尼器选取 $C = 2\ 000\ \text{kN}/(\text{m}/\text{s})^{0.2}$ 、 $a = 0.2$ 、 $C = 3\ 000\ \text{kN}/(\text{m}/\text{s})^{0.4}$ 、 $a = 0.4$ 及 $C = 4\ 000\ \text{kN}/(\text{m}/\text{s})^{0.6}$ 、 $a = 0.6$ 时,梁端位移控制效果相对最佳。此三种参数组合下,17号和18号桥墩墩底弯矩峰值与原方案比值如表5所列。

表5 位移控制最佳方案与原方案墩底弯矩峰值比值表

Table 5 Ratio of peak bending moment at the bottom of piers of best displacement control scheme to that of original scheme

墩号	$C = 2\ 000$	$C = 3\ 000$	$C = 4\ 000$
	$a = 0.2$	$a = 0.4$	$a = 0.6$
17	96.3%	95.4%	94.3%
18	63.2%	61.5%	60.1%

由表5可知,阻尼器参数选取为梁端位移控制效果相对最佳时,墩底弯矩减震效率相对阻尼器参数选取为墩底减震效果最佳时略有下降,但控制在3%以内。

由表4~5可见,当合理设置阻尼器参数时,18号桥墩墩底弯矩得到明显控制,而17号桥墩弯矩减震效果较差。综合考虑位移与内力控制效果, $C = 3\ 000\ \text{kN}/(\text{m}/\text{s})^{0.4}$ 、 $a = 0.4$ 及 $C = 4\ 000\ \text{kN}/(\text{m}/\text{s})^{0.6}$ 、 $a = 0.6$ 可作为推荐的阻尼器参数。

4.4 速度锁定器方案减震效率分析

设置速度锁定器前后17、18号墩墩底弯矩响应峰值如图12所示。

由图12可以看出,设置LUD装置后,17号墩弯矩峰值减小了9.9%,而18号墩弯矩峰值减小了4.11%。速度锁定器减震效果不佳。

对设置LUD装置后的该大跨度钢桁连续梁桥进行振动特性分析可知,设置LUD装置后该桥纵向周期由原设计方案1.828 s变为0.721 s,对应的

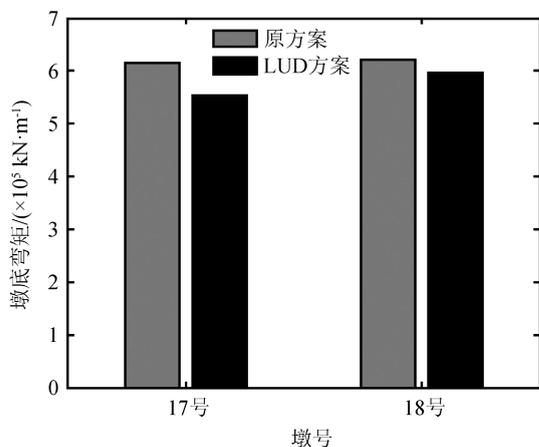


图 12 墩底弯矩对比图

Fig.12 Comparison of peak bending moment at the bottom of piers

表 6 减震效率对比表

Table 6 Comparison of damping efficiency

墩号	组合方案弯矩值 (kN·m)	组合方案 减震效率/%	摩擦摆方案 减震效率/%	阻尼器方案 减震效率/%
17	364 300.5	40.80	24.0	6.0
18	406 323.0	34.60	18.6	39.2

径为 8 m 的摩擦摆方案的 166.7 mm 降低到了 122.3 mm, 位移控制效果明显。

4.6 各减震方案有效性分析

由上分析可知, 摩擦摆方案下主墩弯矩减震效率在 17%~25% 间, 墩底内力峰值响应受到了一定的控制, 但梁端位移需求大为增加。

阻尼器方案在合适的装置参数下 18 号墩内力控制效果明显, 最佳参数下减震效率高达 41.6%, 梁端位移相对原设计方案明显减小, 但 17 号主墩内力峰值响应变化不大, 最佳参数下减震效率未超过 7%。

速度锁定器方案下 17 号墩弯矩峰值相对原设计方案减小了 9.9%, 而 18 号其峰值仅减小了 4.11%, 减震效果十分有限。

组合减震方案当选择摩擦摆滑动半径为 8 m、阻尼器阻尼常数为 3 000 kN/(m/s)^{0.5}、速度指数为 0.5 时, 17、18 号墩墩底弯矩减震效率均达到 34% 以上, 同时该方案梁端位移值控制效果良好, 宜作为推荐方案。

组合减震方案上述参数的选取具有一定的随意性, 本文认为还可以进一步优化参数, 以实现更好的减震效果。

场地反应谱值增大了 2.53 倍, 地震输入能量大为增加。故速度锁定器不适用于此类桥型。

4.5 组合减震方案减震效率分析

由 4.1 及 4.2 节分析结果, 综合考虑梁端位移和墩底内力控制效果, 选定的摩擦摆支座附加阻尼器组合减震方案为在 17 和 18 号墩上设置滑动半径为 8 m 的单向摩擦摆支座, 同时设置两个阻尼常数为 3 000、速度指数为 0.5 的阻尼器。

表 6 列出了减震方案在纵向人工波激励下的峰值弯矩值和与设计方案的减震效率及对应参数的摩擦摆方案与阻尼器方案减震效率。

由表 6 可以看出, 相比对应参数的摩擦摆方案和阻尼器方案, 组合减震方案下 17 和 18 号墩墩底弯矩均得到了良好控制, 同时梁端位移值由滑动半

5 结论

本文以一座全长 504 m 的三跨铁路钢桁连续梁特大桥为工程背景, 对大跨铁路钢桁连续梁桥减隔震优化设计进行了探讨, 研究结论如下:

(1) 因上部结构质量相对较轻, 墩身自振导致的惯性力占桥墩地震内力响应的很大一部分, 摩擦摆方案下大跨度铁路钢桁梁连续桥墩底内力减震效率一般, 且墩底内力对滑动面半径变化并不敏感。在选取滑动半径时应更多地考虑行车平顺性和梁端位移值的限制。

(2) 设置速度锁定器后, 主导纵向振型周期对应的场地反应谱值增大了 2.53 倍, 地震输入能量大为增加, 结构内力响应未见明显降低, 速度锁定器不适用此类桥型。

(3) 阻尼器方案能有效降低梁端位移响应, 对活动墩内力减震效果明显, 但其不能有效降低固定墩内力。若要在分析桥梁上设置该阻尼器, 综合考虑位移与内力控制效果, $C = 3\ 000\ \text{kN}/(\text{m}/\text{s})^{0.4}$ 、 $a = 0.4$ 及 $C = 4\ 000\ \text{kN}/(\text{m}/\text{s})^{0.6}$ 、 $a = 0.6$ 均可作为推荐的优化阻尼器参数。

(4) 摩擦摆支座附加阻尼器组合减震方案能有

效的降低纵向地震激励下大跨度铁路钢桁梁连续桥的内力与位移响应,可作为此类桥型推荐的减隔震设计方案。但此种方案装置参数数目较多,如何合理高效地确定最优参数组合,实现最佳抗震性能依然是一个值得研究的问题,也是作者课题组下一步研究工作中需要解决的问题。

参考文献(References)

- [1] JANGID R S. Seismic Response of Isolated Bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2004, 9(2): 155-166.
- [2] 郭磊, 李建中, 范立础. 大跨度连续梁桥减隔震设计研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 81-85.
GUO Lei, LI Jianzhong, FAN Lichu. Research on Seismic Isolation Design for Long-span Continuous Bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(3): 81-85.
- [3] CONSTANTINO M C, WHITTAKER A S, KALPAKIDIS Y, et al. Performance of Seismic Isolation Hardware Under Service and Seismic Loading, MCEER 07-0012[R]. New York: University at Buffalo, 2007.
- [4] LOSANNO D, SPIZZUOCO M, SERINO G. Optimal Design of the Seismic Protection System for Isolated Bridges[J]. Earthquakes and Structures, 2014, 7(6): 969-999.
- [5] KOVAL V. Improved Simplified Methods for Effective Seismic Analysis and Design of Isolated and Damped Bridges in Western and Eastern North America[D]. Toronto: University of Toronto, 2015.
- [6] 邵长江, 房麟, 钱永久. 基于高阻尼橡胶支座的混凝土连续梁桥减隔震性能[J]. 公路交通科技, 2015, 32(10): 57-61.
SHAO Changjiang, FANG Lin, QIAN Yongjiu. Seismic Isolation Performance of Concrete Continuous Girder Bridge Based on High Damping Rubber Bearings[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(10): 57-61.
- [7] 刘鹏. 限制位移桥墩的连续刚构桥抗震性能研究[J]. 地震工程学报, 2015, 37(1): 120-125.
LIU Peng. Seismic Performance of a Continuous Rigid Frame Bridge with Displacement-restricted Piers[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(1): 120-125.
- [8] 李喜梅, 杜永峰. 非平稳地震激励下隔震曲线梁桥振动控制研究[J]. 地震工程学报, 2016, 38(1): 103-108.
LI Ximei, DU Yongfeng. Vibration Control of Isolated Curved Girder Bridges Under Nonstationary Seismic Excitation[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(1): 103-108.
- [9] 韩鹏, 夏修身, 张永亮, 等. 中宁黄河大桥地震反应分析[J]. 兰州交通大学学报, 2007, 26(1): 82-85.
HAN Peng, XIA Xiushen, ZHANG Yongliang, et al. Seismic Analysis of Zhongning Yellow River Bridge[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2007, 26(1): 82-85.
- [10] 左家强. 太中银铁路中宁黄河特大桥桥式方案研究[J]. 铁道工程学报, 2013(12): 36-40.
ZUO Jiaqiang. Bridge Type Study on Zhongning Yellow River Super Major Bridge on Taiyuan-Zhongwei-Yinchuan Railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2013(12): 36-40.
- [11] ZAYAS V A, LOW S, MOKHA A S, et al. Seismic Isolation of Benicia-Martinez Bridge [G]//Proceedings, Structures 2001, Washington, D.C., United States; Structural Engineering Institute of ASCE, 2001: 21-23.
- [12] 陈兴冲, 商耀兆, 张永亮, 等. 高墩大跨度铁路简支钢桁梁桥的减震性能分析[J]. 世界地震工程, 2008, 24(1): 6-11.
CHEN Xingchong, SHANG Yaozhao, ZHANG Yongliang, et al. Analysis of Seismic Reduction Performance on the High Pier and Long Span Railway Simply-supported Steel Truss Girders[J]. World Earthquake Engineering, 2008, 24(1): 6-11.
- [13] 张永亮, 陈兴冲, 吴海燕. 基于黏滞液体阻尼器的铁路钢桁梁桥减震研究[J]. 世界地震工程, 2009, 25(4): 97-102.
ZHANG Yongliang, CHEN Xingchong, WU Haiyan. Research on Seismic Response Reduction with Viscous Dampers in the Railway Steel Truss Girder Bridge[J]. World Earthquake Engineering, 2009, 25(4): 97-102.
- [14] 张常勇, 王志英, 王宏博. 长联大跨连续钢桁梁桥减隔震设计研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(8): 80-88.
ZHANG Changyong, WANG Zhiying, WANG Hongbo. Study on Seismic Mitigation And Isolation Design for a Long-span Continuous Steel Truss Beam Bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(8): 80-88.
- [15] 王志英, 张常勇. 大跨度连续钢桁梁桥摩擦摆支座减隔震设计分析[J]. 桥梁建设, 2015(2): 58-64.
WANG Zhiying, ZHANG Changyong. Design and Analysis of Friction Pendulum Bearings for Seismic Mitigation and Isolation of Long SPAN Continuous Steel Truss Girder Bridge[J]. Bridge Construction, 2015(2): 58-64.
- [16] 朱开才. 设置 TMD 的高墩大跨铁路钢桁梁桥减震分析[J]. 世界桥梁, 2015(5): 49-52.
ZHU Kaicai. Analysis of TMD Vibration Damping Effect on Long-span Railway Steel Truss Girder Bridge with High-rise Piers[J]. World Bridges, 2015(5): 49-52.
- [17] 叶爱君, 管仲国. 桥梁抗震[M]. 第 2 版. 北京: 人民交通出版社, 2002.
YE Aijun, GUAN Zhongguo. Seismic Design of Bridges[M]. 2nd Edition. Beijing: China Communications Press, 2002.
- [18] 铁路工程抗震设计规范: GB 50111-2006[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.
Code for Seismic Design of Railway Engineering: GB 50111-2006[S]. Beijing: China Planning Press, 2009.
- [19] CSI. CSI Analysis Reference Manual[M]. Berkeley, CA: Computers and Structures Inc., 2011.