

# Research on Optimization Design of Railway Bridge Damping Tenon in High-intensity Seismic Area

Pang Lin\*, Zeng Yongping, Dong Jun

China Railway Eryuan Engineering Group Co, Ltd, Chengdu, China

**Email address:**

panglin1989@hotmail.com (Pang Lin)

\*Corresponding author

**To cite this article:**

Pang Lin, Zeng Yongping, Dong Jun. Research on Optimization Design of Railway Bridge Damping Tenon in High-intensity Seismic Area. *Science Discovery*. Vol. 6, No. 6, 2018, pp. 500-505. doi: 10.11648/j.sd.20180606.30

**Received:** October 25, 2018; **Accepted:** November 30, 2018; **Published:** December 12, 2018

**Abstract:** The railway bridge damping tenon device can not only provide lateral, longitudinal and vertical stiffness, which means that the displacement of main beam will be effectively limited under earthquakes. The energy dissipation system formed by shock-absorbing bearing-damping tenon also has significant energy consumption performance, which can meet the seismic demand of the bridge in the high seismic intensity zone of the southwest mountainous area. However, the gap and yield force of the damping tenon and the design parameters of shock-absorbing bearing have a significant impact on the seismic isolation effect and on the limitation of the main beam displacement. Therefore, this paper takes the typical high-speed railway bridge in the southwest mountainous near-fault zones as research object, and a refined finite element analysis model of the bridge system considering the nonlinear dynamic coupling effects such as geometry, material and contact is established to study the most suitable design parameters of damping tenon. In general, the shock absorption rate of the pier bottom bending moment increases with the increases of the tenon's gap and decreases with the increase of the tenon's yield force. However, the determination of the damping tenon's design parameters requires a comprehensive consideration of displacement limitation of the main beam. The research results can provide a basis for the optimization design of railway bridge damping tenon device in the future.

**Keywords:** Railway Bridge, Damping Tenon, Seismic Isolation Device, Optimization Design

---

## 高烈度地震区铁路桥梁减震卡榫优化设计研究

庞林\*, 曾永平, 董俊

中铁二院工程集团有限责任公司, 成都, 中国

**邮箱**

panglin1989@hotmail.com (庞林)

**摘要:** 铁路桥梁减震卡榫不仅能够提供横向、纵向和竖向刚度, 在强震作用下可有效限制主梁位移, 由其形成的减震支座—金属阻尼器组合减震耗能体系还能有效耗散地震能量, 能够满足西南山区高地震烈度区桥梁抗震需求。然而, 减震卡榫的间隙、刚度和减震支座设计参数对减隔震效果及主梁位移的限制具有重大的影响。为此, 本文以西南山区近断层高速铁路典型梁桥为研究对象, 建立考虑几何、材料、接触、基础与结构相互作用等非线性动力耦合影响的桥梁系统精细化有限元分析模型, 研究减震卡榫最优设计参数。总体而言, 墩底弯矩减震率随着卡榫间隙增大而增大, 随着卡榫屈服力增大而减小。但是卡榫设计参数的确定还需综合考虑对主梁位移的限制。研究成果可以为今后铁路桥梁减震卡榫的优化设计提供依据。

**关键词：**铁路桥梁，减震卡榫，减隔震装置，优化设计

1. 引言

中国西南山区地形复杂、山高谷深、沟壑纵横，活动断层分布密集，许多铁路线路不可避免地出现了跨越或靠近地震断层的情况，频发的地震已严重威胁到桥梁结构的运营安全。很多学者在公路、市政桥梁减隔震技术方面做了大量研究工作，研发了多种减震耗能限位装置[1-3]。然而，铁路桥尤其是高铁桥梁与公路桥梁在结构刚度、动力性能方面有很大差异，而铁路桥梁减隔震体系目前仍较为单一[4-9]，主要采用耗能支座+传统防落梁相组合的方式，不具备竖向限位功能，且在近断层高烈度地震区适应性较差，难以满足西南山区高地震烈度区桥梁抗震的迫切需求，已有学者对此开展了研究工作。文献研发了一种新型减震卡榫装置，研究表明，该装置不仅能够提供横向、纵向和竖向刚度，能够适应结构温度变形，在桥梁正常运营工况下不起作用。在地震作用下，由其形成的摩擦摆支座—金属阻尼器—桥墩底塑性铰组成的三级减震耗能体系，还具有限位功能，在中小震下可有效限制主梁位移[10-12]。

减震卡榫的间隙、屈服力和支座摩擦系数均对减隔震效果及主梁位移的限制具有较大的影响，因此开展减震卡榫关键设计参数优化研究十分必要。本文以西南山区近断层高速铁路典型梁桥为研究对象，建立考虑几何、材料和接触等非线性动力耦合影响的桥梁系统精细化有限元分析模型，研究减震卡榫最优设计参数。

2. 计算模型

以三跨32m跨度高速铁路典型简支梁桥为研究对象（图1），桥址位于九度地震区，设计地震动峰值加速度 $A_g=0.4g$ ，地震动反应谱特征周期 $T_g=0.45s$ 。桥梁上部结构为预制无砟轨道后张法预应力混凝土简支箱梁，桥面宽度12.6m，主梁梁高为3.05m，主梁采用C50混凝土，主梁自重822t，二期恒载为140kN/m，故主梁每跨总质量为1051.9t。桥墩采用圆端形空心桥墩，墩顶横桥向宽度7m，顺桥向宽度3.2m，墩身纵横向外坡均为40:1，内坡均为50:1，采用C35钢筋混凝土，主筋采用HRB400带肋钢筋。

支座布置方式如图2所示，为提高桥梁抗震性能，拟采用特殊设计的球型钢支座，在正常使用状态下摩擦系数为0.01，在大震作用下销钉剪断，摩擦系数可增加至0.2~0.3。支座竖向承载力为5500kN，水平承载力设计为竖向承载力的30%。

采用地震工程模拟的开放体系opensees 软件进行建模，应用弹塑性纤维单元模拟钢筋混凝土桥墩，忽略混凝土抗拉强度，其混凝土和钢筋本构模型分别采用Concrete01和Steel01模拟，如图3(a)-(b)所示。在梁端和墩顶节点之间建立钩和间隙单元，用以模拟卡榫的力学性能，其本构关系如图3(c)所示。

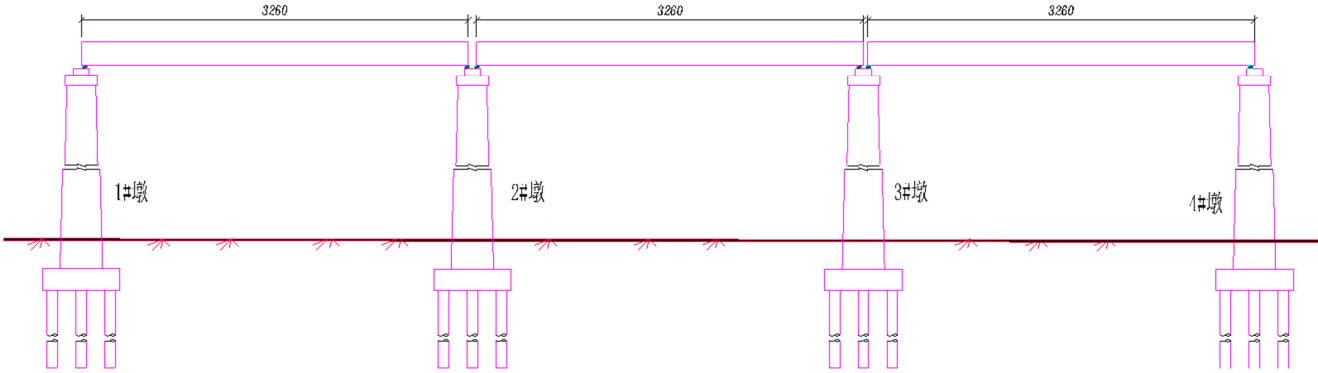


图1 32m跨铁路简支梁桥桥型布置图（单位：cm）。

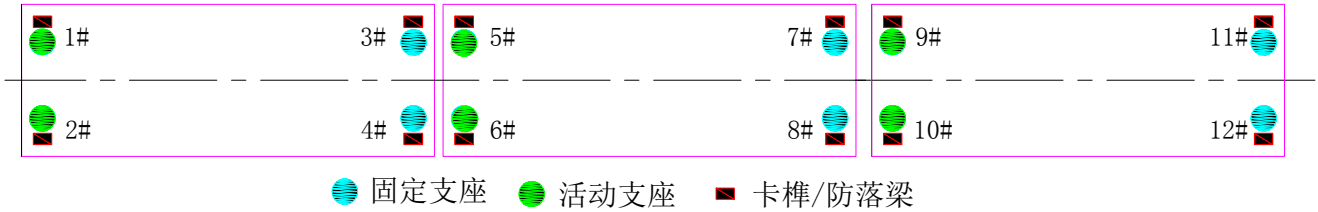


图2 支座的布置图。

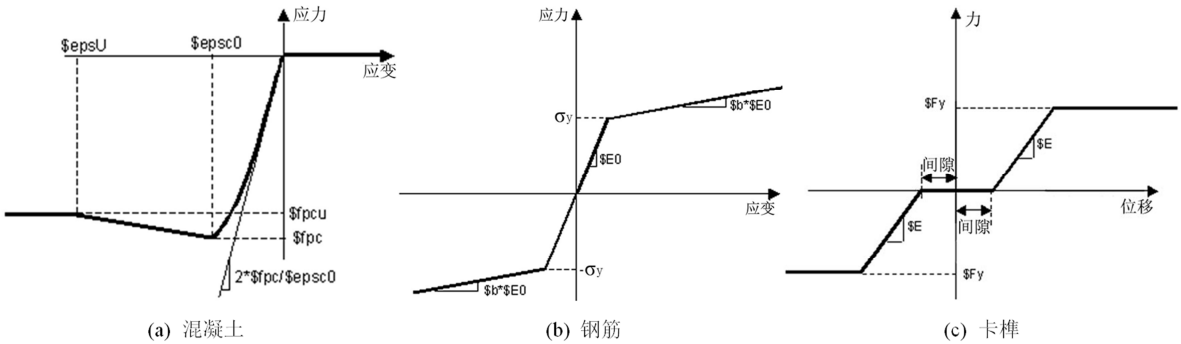


图3 材料本构关系。

3. 减震限位装置的模拟效果

由于篇幅有限，下面仅给出3#桥墩固定支座及其对应的减震卡榫在顺桥向罕遇地震动作用下（地震动峰值加速度 $A_g=0.64g$ ）的滞回耗能与时程曲线。如图4(a)所示可以看出，当支座受到的水平地震力超过其销钉承载能力1650kN时，销钉发生剪断，支座进入滞回耗能阶段。如图3(b)所示，当支座相对位移超过设置的卡榫间隙20mm时，卡榫开始发挥限位作用。当卡榫承受的水平剪力超过其屈服强度350kN时，卡榫进入塑性耗能阶段。如图3(c)所示，在罕遇地震作用下，固定支座的销钉发生剪断，此时支座最大位移达到14.8cm，震后主梁发生了轻微漂移，约为1cm。

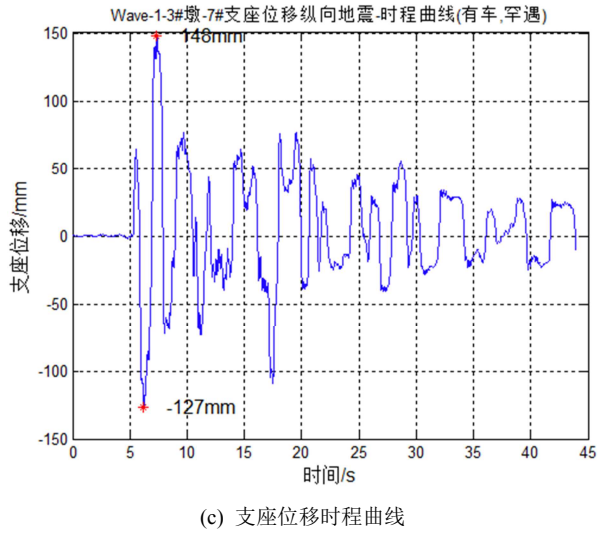
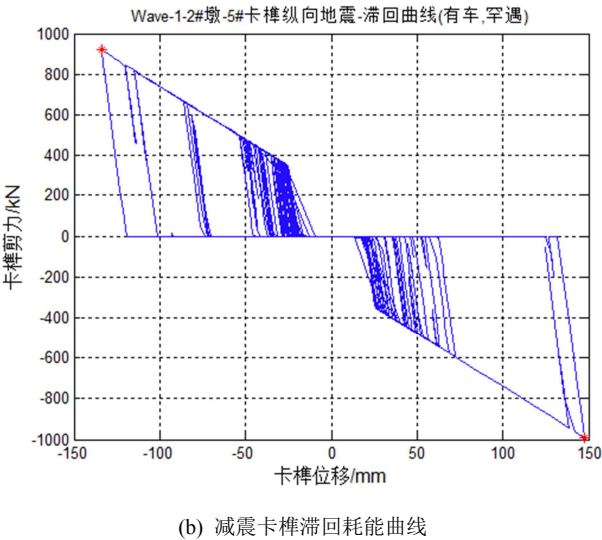
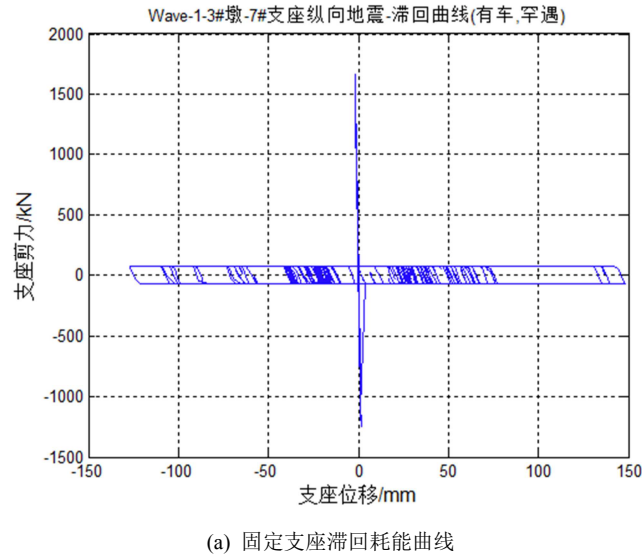


图4 支座及卡榫模拟效果。

表1 减震限位效果。

地震动激励方向	墩底最大弯矩 (kN*m)	首次屈服弯矩 (kN*m)	卡榫最大剪力 (kN)	卡榫极限荷载 (kN)	支座最大位移 (mm)	墩底弯矩平均减 震率
横桥向	$1.92\times10^5$	$3.2\times10^5$	1003	885	149	35%
纵桥向	$1.48\times10^5$	$1.9\times10^5$	970	885	144	27%

4. 减震限位效果分析

表1给出了在支座摩擦系数取为0.02，卡榫屈服强度取为350kN，卡榫间隙在纵桥向和横向两个方向上均设置为20mm时的桥梁主要抗震性能指标。计算其墩底弯矩减震率所采用的参考对象为普通支座+弹性防落梁挡块。对比工况中依据传统铁路防落梁挡块的设计经验，将纵桥向间隙设置为70mm，横桥向间隙设置为30mm，刚度较大且假定不发生屈服。

可以看出，当采用减震卡榫替代传统防落梁挡块时，其墩底弯矩得到了显著的降低，不超过墩底屈服弯矩，支座最大位移也控制在150mm以内，取得了良好的减震限位效果。但是卡榫的最大剪力为1003kN，超过了其自身的极限荷载885kN，需要进行优化设计。

图5所示给出了桥墩在罕遇地震下的滞回耗能曲线。从图中可以看出，桥墩出现混凝土开裂，墩体刚度下降的现象，但桥墩并未发生明显屈服，也没有出现塑性铰。减震卡榫起到了良好的减震限位效果。

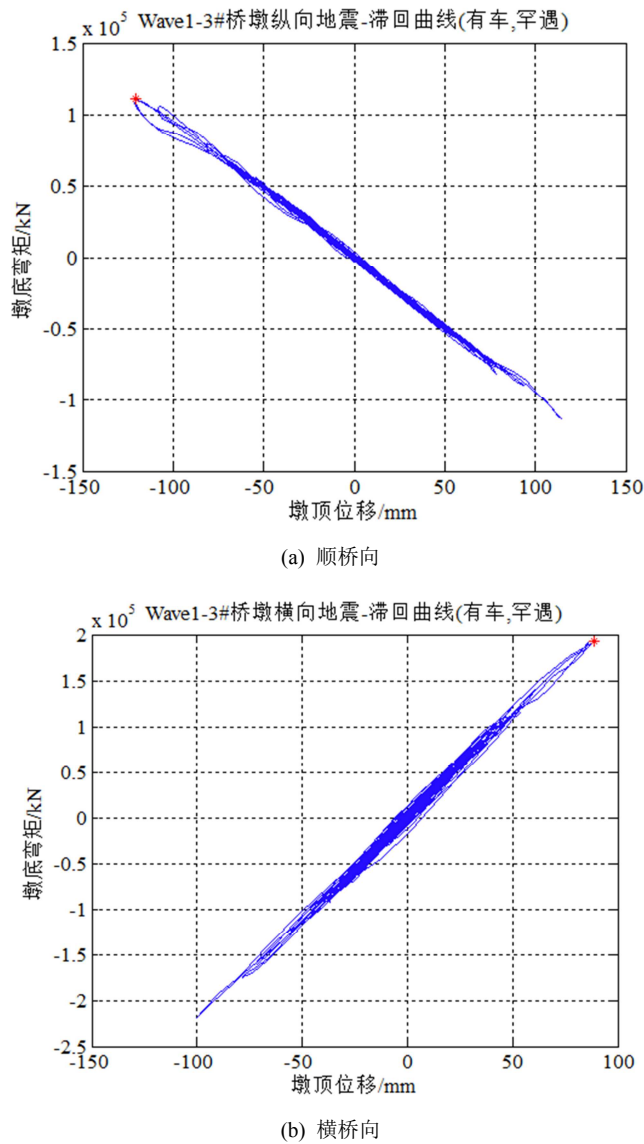


图5 罕遇地震下桥墩滞回曲线。

5. 减震限位装置优化设计

减震限位装置的关键设计参数主要包括，支座自身的摩擦系数（取0.01、0.02和0.03），减震卡榫的屈服力（取350kN、400kN、450kN和500kN）及间隙（10mm、20mm、30mm和40mm），下面将针对这三个主要设计参数的影响进行研究。

5.1. 支座摩擦系数影响

以支座摩擦系数取0.01和0.02时的情况为参考值，对比支座摩擦系数取0.03时墩底弯矩的减少率，如图6所示。可以看出在大部分情况下，随着支座摩擦系数的增大，由于支座摩擦耗能能力的提高，墩底弯矩呈现减小的趋势，最大减少率约在2.5%左右。但个别工况呈现相反的规律，特别是对于横桥向的情况，部分工况出现支座摩擦系数增大，墩底弯矩也增大的情况。

但总体的来看，支座的摩擦系数对墩底弯矩的影响并不太大，影响率均在5%以下，考虑到增大支座摩擦系数将会增加支座正常使用时的磨损，且显著增加支座生产成本，因而这里建议支座摩擦系数取为0.01。

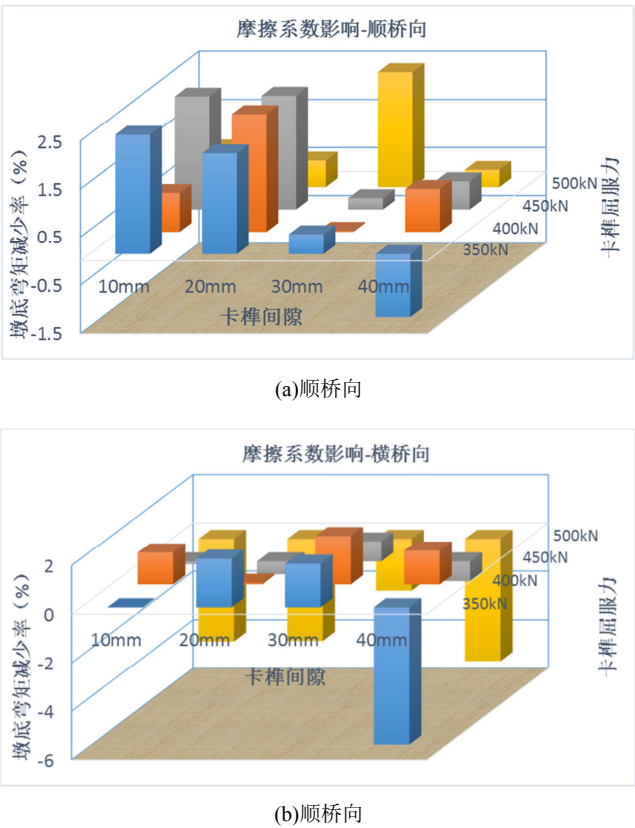


图6 支座摩擦系数的影响。

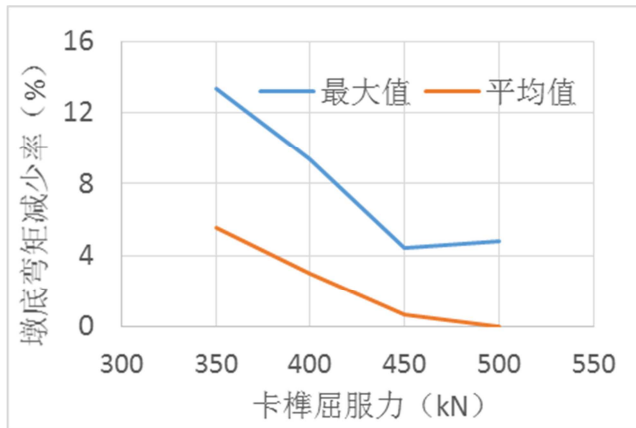
5.2. 减震限位装置承载力影响

图7给出了卡榫间隙设置为20mm时，支座摩擦系数取为0.02时，减震卡榫屈服力分别取350kN，400kN，450kN和500kN的墩底弯矩相对于基准工况计算的墩底弯矩的减少率。这里指的基准工况是所有设计参数组合中计算的最

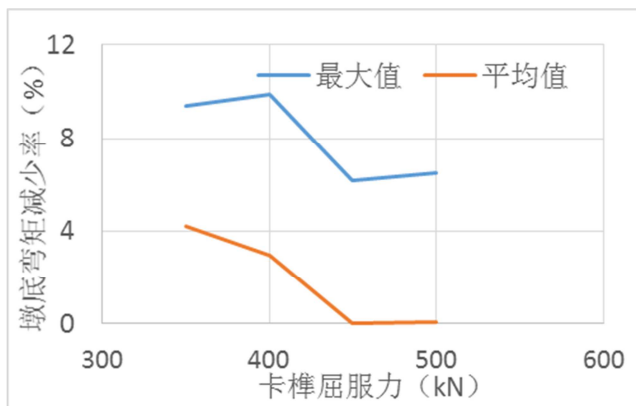


不利墩底弯矩所对应的工况下的结果。图中最大值表示所有地震动计算得到的最大墩底弯矩所对应的减少率,平均值表示所有地震动计算得到的墩底弯矩平均值所对应的减少率。

可以看出,不同地震动对计算结论具有一定的影响,但总体上有墩底弯矩减震率随着卡榫屈服力的增大而减小的规律。合理的设置卡榫屈服力,能够显著减小墩底弯矩,顺桥向和横桥向最大减少率分别可达13%和10%。因而为保证较高的墩底弯矩减震率,卡榫屈服力不宜设置的过大,但同时应注意卡榫承受的最大荷载小于其极限承载力。



(a) 顺桥向



(b) 横桥向

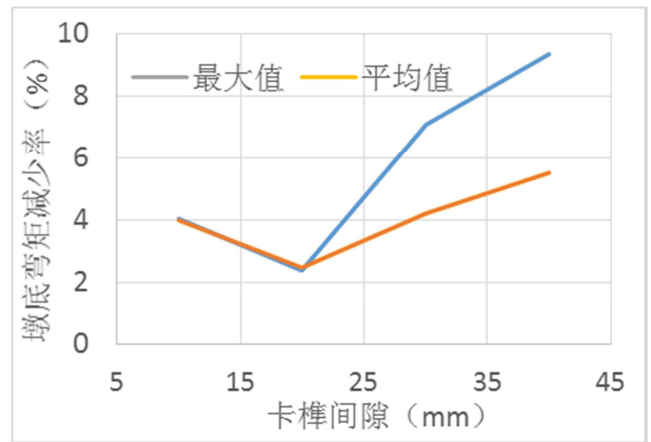
图7 减震卡榫的屈服力的影响。

### 5.3. 减震限位装置间隙的影响

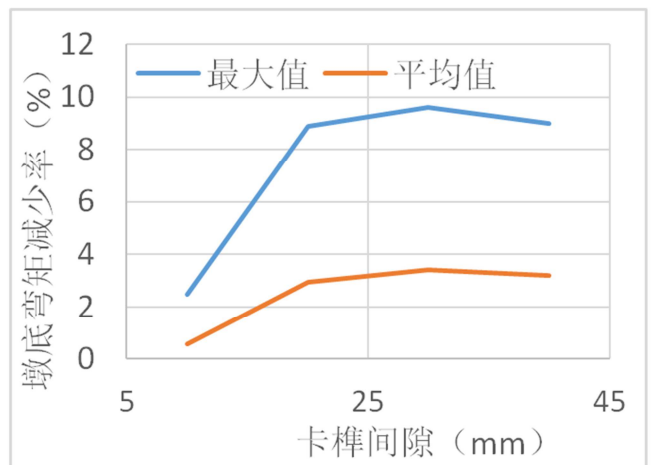
图8给出了减震卡榫屈服力取为400kN,支座摩擦系数取为0.02时,卡榫间隙分别设置为10mm、20mm、30mm和40mm时的墩底弯矩减少率。这里计算墩底弯矩减少率的参考值及图中最大值和平均值的含义同5.2节。

可以看出,除去10mm的情况,在顺桥向地震作用下总体上有墩底弯矩减震率随着卡榫间隙的增大而增大的规律。在横桥向地震作用下,当减震卡榫过小(设置为10mm时),墩底弯矩减震率不超过4%。而将间隙设置为30mm以上,墩底弯矩将显著减小,顺桥向和横桥向墩底弯矩减少率最大值分别为7%和10%。因而为保证较高的墩

底弯矩减震率,卡榫间隙不宜设置的过小,但同时应避免支座相对位移过大造成落梁,这里将卡榫间隙设置为30mm较为合适。



(a) 顺桥向



(b) 横桥向

图8 减震卡榫间隙的影响。

### 5.4. 减震限位装置合理参数确定

将卡榫极限承载力与支座位移作为必须满足的限制条件,将墩底弯矩作为优化目标,确定减震卡榫最优设计参数。这里支座的摩擦系数取为0.01,卡榫的屈服力在顺桥向和横桥向上分别设置为400kN和450kN,其间隙均取为30mm。

计算结果如表2所示。卡榫承载力最大值分别为1003kN,小于极限承载力1138kN。与优化设计前支座最大位移为149mm相比,当前支座顺桥向和横桥向最大位移分别为144mm和146mm,支座位移也相对减小。卡榫承载力与支座位移均能够满足设计要求。从优化目标方面来看,与普通支座+弹性防落梁挡块的工况相比,优化后的减隔震桥梁顺桥向和横桥向墩底弯矩最大减震率分别为36.4%和26.5%,墩底弯矩得到了显著的降低。

表2 减震卡榫最优设计参数。

激励方向	工况	屈服力(kN)	间隙(mm)	弯矩最大值(kN*m)	卡榫剪力(kN)	卡榫极限承载力(kN)	支座位移(mm)	支座允许位移(mm)
顺桥向	最大值	400	30	1.42E+05	965	1011	144	150
	平局值			1.31E+05	905	1011	133	150
横桥向	最大值	450	30	1.96E+05	1002	1138	146	150
	平局值			1.88E+05	974	1138	137	150

6. 结论

本文以30m墩高典型高速铁路简支梁桥为研究对象，建立考虑几何、材料、接触等非线性动力耦合影响的桥梁系统精细化有限元分析模型，研究减震卡榫最优设计参数。得到了一些结论和规律，可以为今后铁路桥梁减震卡榫的优化设计提供依据。

（1）支座的摩擦系数对墩底弯矩的影响不大，考虑到增大支座摩擦系数将会增加支座正常使用时的磨损和加工制造成本，因而这里建议支座摩擦系数取为较小值0.01。

（2）总体来看墩底弯矩减震率随着卡榫屈服力的增大而减小，因此卡榫屈服力不宜设置的过大，但应注意卡榫承受的最大荷载小于其极限承载力，并应满足支座相对位移限值要求。

（3）总体来看墩底弯矩减震率随着卡榫间隙的增大而增大，卡榫间隙不宜设置的过小，但应避免支座相对位移过大造成落梁和避免间隙设置过大，在设计地震动作用时卡榫不能发挥作用。

（4）减震卡榫合理参数的确定除了要比较墩底弯矩的减震效果，还要考虑卡榫的极限承载力与支座的最大位移，经过优化设计的减隔卡榫能够取得较好的减震耗能和限位效果。

参考文献

[1] 杨鸿波. 红水河大桥主桥结构抗震性能优化研究[J]. 中外公路. 2015(05): 205-209.

[2] 彭天波, 李建中, 范立础. 双曲面球型减隔震支座的开发及应用[J]. 同济大学学报(自然科学版). 2007(02): 176-180.

[3] 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(05): 118-128.

[4] 胡连军, 杨吉忠. 高墩铁路桥梁减震技术进展研究[J]. 铁道工程学报. 2016(06): 72-76.

[5] 夏修身, 赵会东, 欧阳辉来. 高速铁路桥梁基于摩擦摆支座的减隔震研究[J]. 工程抗震与加固改造. 2014(03): 21-26.

[6] 李程, 张念来. 铁路钢桁拱桥减隔震支座设计参数的优化研究[J]. 公路工程. 2009(03): 89-93.

[7] 杨风利, 钟铁毅, 夏禾. 铁路简支梁桥减隔震支座设计参数的优化研究[J]. 铁道学报. 2006(03): 128-132.

[8] 王凯. 连续梁桥减隔震支座参数设计与优化[D]. 西南交通大学, 2014.

[9] 陈列, 艾忠良, 钟洪军, 等. 一种铁路桥梁球铰式竖向限位器的研究与应用[J]. 铁道建筑. 2016(10):25-28.

[10] 郑晓龙, 曾永平, 游励晖, 等. 铁路桥梁减震卡榫的设计与应用性能研究[J]. 高速铁路技术. 2016(06): 30-33.

[11] 杨标, 熊劲松, 刘海亮. 减震卡榫结构设计及弹性分析研究[J]. 西南公路, 2011(4):47-51+55.

[12] 赵一. 摩擦耗能减震结构分析设计的非线性静力方法[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.