

# 地震落梁两级控制装置的开发与试验\*

孙广俊, 王 森, 李鸿晶

(南京工业大学土木工程学院 南京, 211816)

**摘要** 为了增强桥梁抗御地震落梁的能力,减轻交通生命线系统的震害损失,基于耗能减震、多级设防和结构分灾三个抗震性能设计理念,设计了一种具有耗能限位和上部体系连续化两级功能,并能不同水准地震下自动实现功能转换的地震落梁控制装置。首先,分析了装置的构成、特点和工作机理,对第 1 级耗能限位组件进行了拟静力试验,测试了耗能滞回曲线;然后,对第 2 级拉索连梁组件进行了静力拉伸试验,评价了其变形性能、破坏形式和锚固性能;最后,对抗震销栓进行了剪切试验,考察了控制级别的转换,采用试验结果对有限元模拟结果进行了验证。研究表明,地震落梁两级控制装置具有有效的位移约束、合理的耗能机制和明确的分灾保险丝构造,实现了梁-梁连接和墩-梁连接控制模式的优势互补,实现了强震作用下对桥梁落梁失效的控制和对桥墩的安全保护。

**关键词** 桥梁;地震;落梁;控制;耗能限位;连梁;结构保险丝

**中图分类号** U442.5<sup>+</sup>5; TH122

## 1 问题的引出

国内外破坏性地震的震害表明,桥梁具有非常大的脆弱性,在地震中极易破坏或失效。在桥梁可能发生的诸多失效破坏中,最为常见和严重的是上部结构的落梁<sup>[1-3]</sup>。一方面,落梁会导致交通中断,严重影响抗震救灾行动,且震后修复难度很大;另一方面,落梁时梁端很可能会撞击桥墩,导致桥梁的整体倒塌,从而造成更大的震害。目前实现落梁控制的技术途径主要有 3 种:构造措施、减隔震被动控制和防落梁控制系统。构造措施主要采取基于震害经验的定性设计,在地震中很难真正起到防落梁效果。减隔震技术具有一定的局限性,不能完全有针对性地解决落梁控制的问题。而科学合理的专门性防落梁装置是减轻桥梁地震落梁灾害的最有效途径。

防落梁装置在美国、日本、台湾等多地震国家和地区的桥梁中得到了较广泛的应用,部分典型装置如图 1 所示。美国和日本率先对防落梁装置开展了一系列的研究,包括对震后防落梁装置效用的实地考察、各种装置的试验研究、参数分析、已有设计方法的评估及新设计方法的探索等<sup>[4-11]</sup>。相比较而言,国内有关落梁控制的系统性研究还为数不多,相

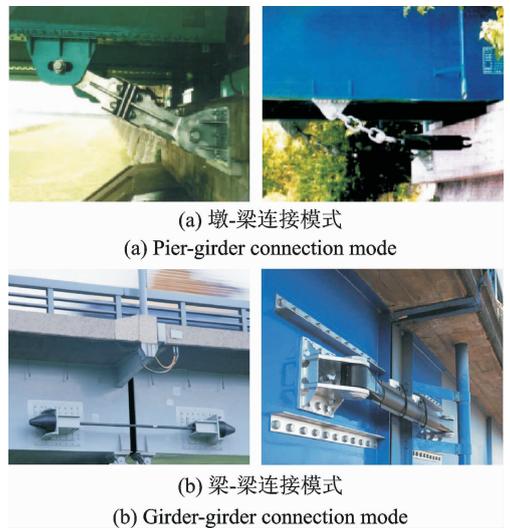


图 1 典型防落梁装置

Fig. 1 Typical unseating prevention devices

关的装置研发和实用化还处于起步阶段<sup>[5]</sup>。欧维姆公司<sup>[12]</sup>在参考国外体系的基础上,提出了一种新型的钢绞线拉索式防落梁装置,在国内较早研发了产品系列,并在我国四川、山西、台湾等地区的工程中进行了应用。

笔者建立了一种地震落梁两级控制装置,分别通过耗能限位和主梁连续化的模式控制落梁的发生;开展了两级控制装置的力学试验和有限元数值

\* 国家自然科学基金资助项目(51308293);江苏省自然科学基金资助项目(BK20130937);江苏省建设系统科技项目(2015ZD75)

收稿日期:2017-07-13;修回日期:2018-01-29

模拟,测试和验证控制系统在不同控制级别下的工作机理和力学性能。

## 2 地震落梁两级控制原理

### 2.1 设计理念

按照连接模式,防落梁装置可以分为梁-梁连接模式和墩-梁连接模式两类<sup>[13]</sup>。梁-梁连接模式可以实现上部结构的连续化,防止梁体坠落,但基本上没有改变上部结构与下部结构的相互作用行为,上部结构可能产生比较大的位移而不能得到有效的控制,如图 2(a)所示。墩-梁连接模式虽然可以有效地控制上部结构的位移,但有可能导致或加重下部结构的破坏,如图 2(b)所示。此外,单一的梁-梁连接模式或墩-梁连接模式均属于单水准控制,不能有效地控制结构在地震下的破坏程度。

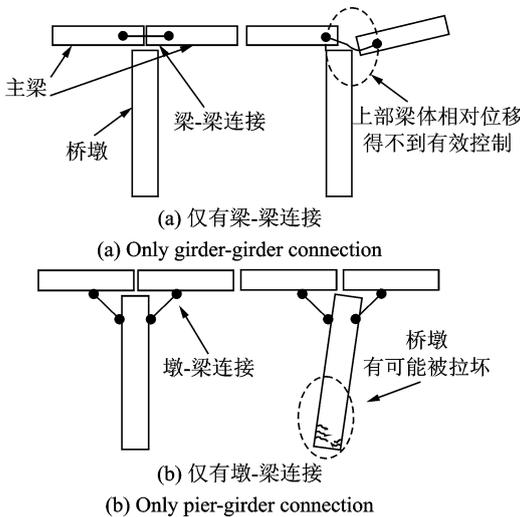


图 2 两类防落梁连接模式

Fig. 2 Two kinds of unseating prevention connection mode

为了减少桥梁在第 1 级设防水准地震下墩梁间的相对位移,有效防止落梁。同时,又要避免在第 2 级设防水准地震下由于限位作用使桥墩产生过大的附加力,从而保证桥墩的安全。基于耗能减震、多级设防及结构分灾的抗震设防思想,构建了一种具有耗能限位功能和上部体系连续化功能,并能不同水准地震下自动实现两级功能转换的新型落梁失效控制系统<sup>[14]</sup>,如图 3 所示。

### 2.2 控制目标

该系统可实现两级控制目标:a. 第 1 级控制以墩-梁连接方式实现,即主梁与桥墩之间采用耗能连接,当遭遇小震和中震时系统以第 1 级控制模式发

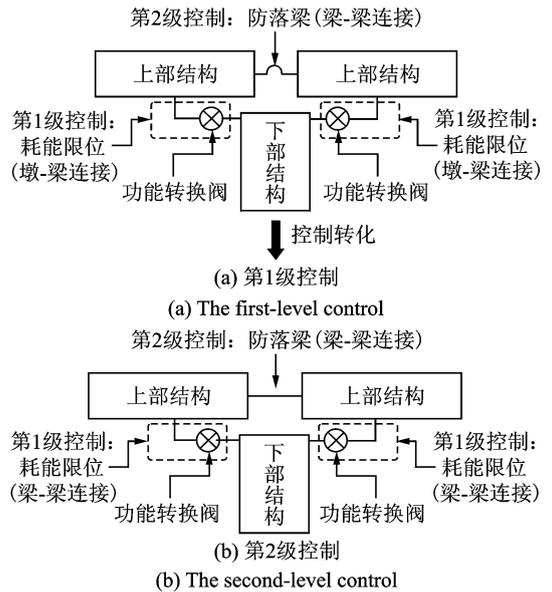


图 3 地震落梁两级控制原理

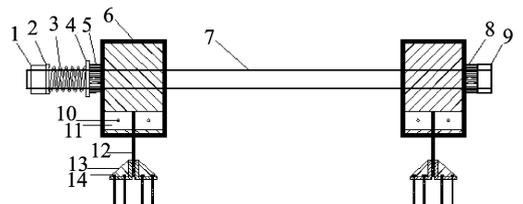
Fig. 3 Principle of two-level seismic unseating control

挥作用;b. 第 2 级控制以梁-梁连接方式实现,即上部主梁之间采用连梁缓冲连接,并预留合适的松弛长度,以确保在第 1 级控制阶段梁-梁连接不发挥作用,仅当遭遇大震时以第 2 级控制模式工作。此外,第 1 级控制与桥墩之间采用“结构保险丝”连接,考虑有效的断开强度,以确保在达到转换强度阈值时释放对桥墩的附加地震力,减轻桥墩的地震损伤。

## 3 地震落梁两级控制装置设计

基于上述原理,设计了一种地震落梁两级控制装置<sup>[15]</sup>,两级装置包括限位构造(实现耗能限位功能)和钢绞线拉索构造(实现上部体系连续化功能),如图 4、5 所示。

限位构造通过软钢阻尼器发挥耗能限位作用,允许桥梁上、下部结构发生一定的相对位移量。软钢阻尼器下端固定在桥墩上,上端通过角钢和抗剪



1-锚具;2-弹簧止挡板;3-缓冲弹簧;4-弹簧垫板;5,8-高阻尼橡胶垫;6-连梁固定装置;7-钢绞线;9-锚具;10-抗剪螺栓;11-角钢;12-软钢阻尼器;13,14-限位固定装置

图 4 装置设计图

Fig. 4 Design diagram of device

螺栓与连梁装置连接为整体,当达到预设阈值时抗剪螺栓断开,装置进入第2级工作状态。为了保证地震作用下抗剪螺栓能够顺利剪断,两级控制装置在耗能限位后进入下一级工作状态,要求螺栓的剪断力应处于软钢阻尼器屈服力  $P_1$  和极限力  $P_2$  之间。对于不同型号、不同材料和不同数量的软钢阻尼器应计算配合相应的螺栓,以满足设计要求。

钢绞线拉索一端为可移动锚固,另一端为固定锚固。可移动锚固端包括锚具、弹簧止挡板、缓冲弹簧、弹簧垫板及高阻尼橡胶垫。固定锚固端包括高阻尼橡胶垫和锚具,两侧的连接梁固定装置分别安装在相邻的主梁上,并通过钢绞线拉索联系在一起。钢绞线的规格和数量根据上部梁体的重量确定。锚

具采用具有足够强度的钢制锥形锚具,弹簧为圆锥型,在钢绞线完全工作时能够被很好的压并,高阻尼橡胶用以缓和地震时强大的冲击力。

两级控制装置工作机理如图6所示。在正常状态下,控制系统不工作(图6(a))。当遭遇中等强烈地震时,系统处于第1级工作状态,限位构造中的软钢阻尼器发挥耗能能力,控制墩梁间的相对位移,形成防落梁系统的首道防线,此时第2级控制不发挥作用,如图6(b)所示。当遭遇特别强烈地震时,两级控制连接的抗剪螺栓断开,限位构造退出工作,不再发挥任何作用,钢绞线拉索拉结主梁,同时锚固端弹簧提供足够的缓冲力,控制主梁间的相对位移,形成防落梁系统的第二道防线,如图6(c)所示。

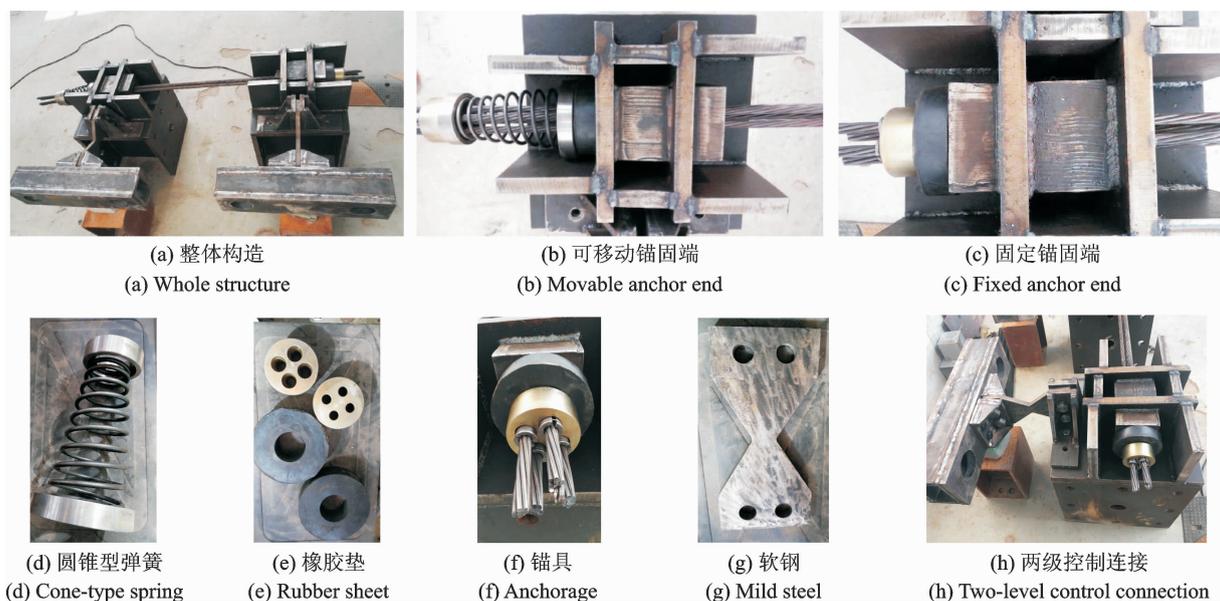


图5 实际装置构造

Fig. 5 Practical device construction

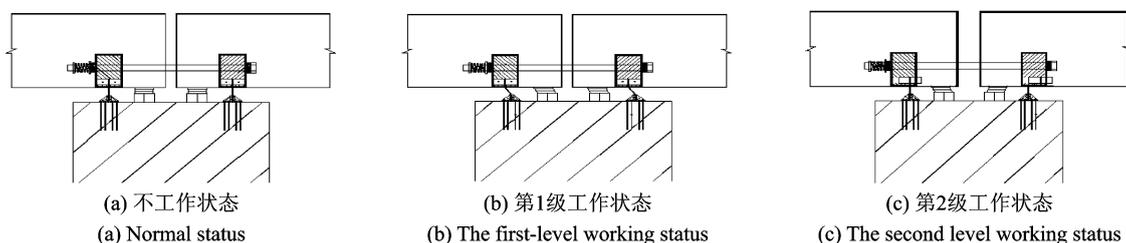


图6 装置工作机理

Fig. 6 Working mechanism of device

## 4 两级控制装置性能试验

为了明确各控制状态和转换过程的性能,检验控制系统的可靠性及有效性,将试验分为3个工况:a.采用拟静力试验测试第1阶段控制性能;b.采用

静力拉伸试验测试第2阶段控制性能;c.采用剪切试验测试控制级别转换性能。

### 4.1 第1级控制装置低周往复试验

耗能限位装置的作用是限制墩梁间的相对位移,主要承受水平地震作用,因此采用低周往复拟静

力试验对其性能进行测试,试验方案如图 7 所示。

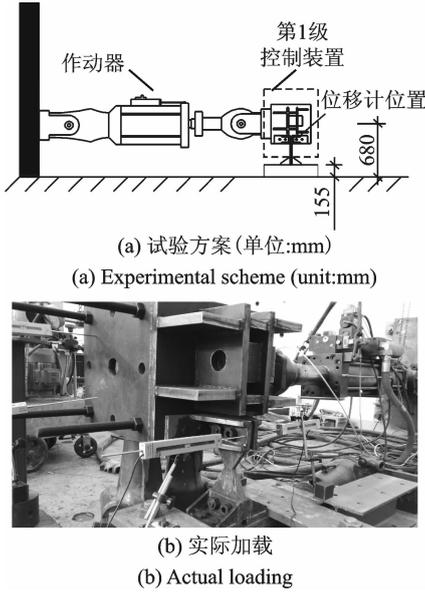


图 7 第 1 级控制装置低周反复试验

Fig. 7 Low cyclic loading experiment of the first level control device

如图 7 所示,在第 1 级控制装置上部固定构件底部支撑 2 台 100 t 液压千斤顶,消除其自重影响,并使之保持水平。采用 50 t 作动器进行水平向加载,作动器一端固定在反力墙上,另一端通过螺栓对口与装置一侧连接紧固,作用在离地面 680 mm 的固定构件中心位置。软钢阻尼器下端与下部固定装置(地梁)的连接不发生转动。采用单向荷载试验所确定的屈服位移作为控制位移,先采用控制位移的 25%,50%和 75%依次进行一次循环,再采用控制位移的 100%,200%,300%,400%,500%,600%和 700%依次进行 3 个循环,加载制度如图 8 所示。

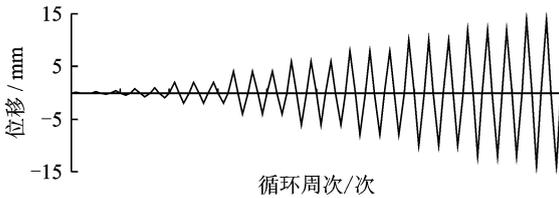


图 8 加载制度

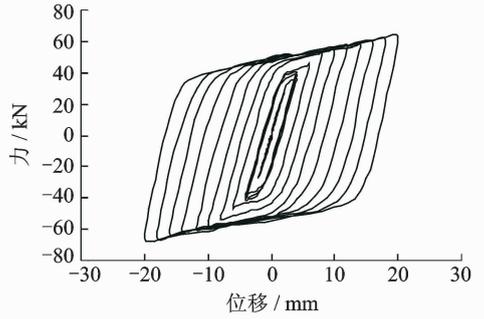
Fig. 8 Loading system

试验中,软钢阻尼器在水平面内上发生了一定的扭转现象,如图 9(a)所示,这与实际工作中桥梁每一侧的第 1 级控制装置存在偏心作用相一致。对于直梁桥而言,地震作用对第 1 级控制装置不会产生明显的扭转效应,通常梁体两侧均安装控制装置,由于对称性,这种扭转效应导致的面外变形更小;而对于曲线梁桥而言,地震作用对第 1 级控制装置会产生一定的扭转效应。试验得到的软钢阻尼器滞回



(a) 试验现象

(a) Experimental phenomenon



(b) 软钢阻尼器滞回曲线

(b) Hysteretic curve of mild steel damper

图 9 第 1 级控制装置试验结果

Fig. 9 Experimental results of the first level control device

曲线如图 9(b)所示。

可以看出,软钢阻尼器在偏心扭转效应下的滞回曲线饱满,每一级刚度退化都比较规律,体现出良好的耗能能力。

### 4.2 第 2 级控制装置静力拉伸试验

连梁拉索装置实现主梁拉结连续化能力,同时提供足够的缓冲力,控制主梁间的相对位移,并缓和地震时强大的冲击力,控制梁体坠落的发生,考虑因素有:a. 钢绞线的设计采用 W/2 静力法<sup>[6]</sup>;b. 第 1 级控制中的耗能限位已经耗散了一部分地震能量,减小了主梁的振动;c. 第 2 级控制中锚固端的弹簧和橡胶垫具有缓冲作用。因此,不考虑主梁脱座后的动力效应,采用单调静力拉伸试验对其性能进行测试,试验方案如图 10 所示。将一端固定装置通过连接长杆固定在压剪机上部千斤顶作用面上,另一端固定装置通过地锚螺栓固定在地梁上,整个装置呈竖向连接。先采用 1 mm/min 的速度调节压剪机,消除预紧力。然后,采用 5 mm/min 加载速度进行试验,先拉伸至弹簧完全压缩状态,停止加载,然后释放加载位移恢复到初始状态,观察弹簧恢复状况。之后,继续以 5 mm/min 加载速度加载,直至拉索发生破坏。

试验中,第一次加载至弹簧完全压缩,然后释放荷载,弹簧的恢复完好,如图 11 所示。

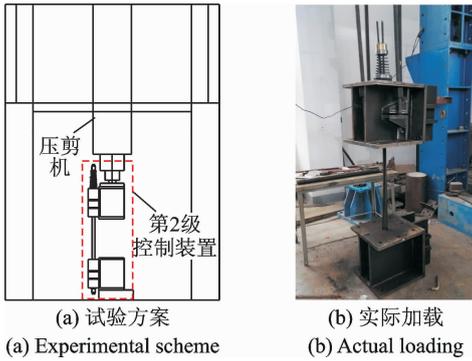


图 10 第 2 级控制装置拉伸试验

Fig. 10 Tensile experiment of the second level control device

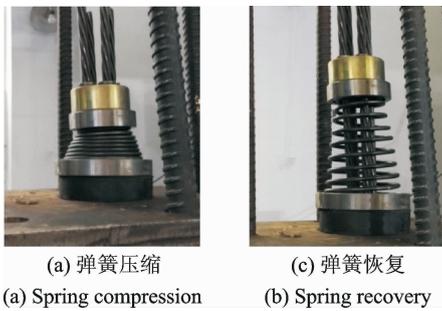


图 11 弹簧压缩-恢复状况

Fig. 11 Compression-recovery status of spring

在第 2 次加载至拉索发生破坏过程中,拉伸起始阶段仅弹簧发挥作用,当位移达到 215 mm 时,弹簧压缩达到极限。之后,高阻尼橡胶垫发挥缓冲作用,当位移达到 315 mm 时,橡胶垫失效,如图 12 所示。随着荷载继续增加,钢绞线受力急剧上升,直至加载到 372 mm,第 1 根钢绞线发生破坏,对应的极限力为 1 003 kN;继续加载到 376.76 mm,第 2 根钢绞线发生破坏,对应的极限力为 971 kN;继续加载到 377.47 mm,第 3 根钢绞线发生破坏,对应的极限力为 917 kN。为了防止钢绞线全部拉断后对压剪机产生冲击作用,停止试验,释放荷载。拉伸试验对应的极限荷载为 1 003 kN,极限位移为 377 mm,与设计的 4 根  $\phi 15.24$  mm 的钢绞线极限荷载 1 044 kN 相接近,极限位移值等于弹簧压缩量、



图 12 高阻尼橡胶垫和弹簧破坏

Fig. 12 Failure of high damping rubber sheet and spring

高阻尼橡胶垫压缩量与钢绞线伸长量之和。钢绞线拉伸试验结果和缓冲部件压缩试验结果分别如表 1, 2 所示,拉伸过程的力-位移曲线如图 13 所示。

表 1 钢绞线拉伸试验结果

编号	原长	拉伸长度	拉伸后总长
1	2 000	1 700	2 070
2	2 000	1 700	2 075
3	2 000	1 700	2 073
4	2 000	1 700	2 078

表 2 缓冲部件压缩试验结果

名称	弹簧/mm	高阻尼橡胶垫/mm
原长	250	40
极限压缩后长度	20	10

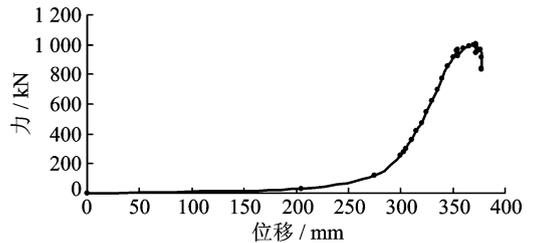


图 13 拉伸试验力-位移曲线

Fig. 13 Force-displacement curve of tensile experiment

此外,试验中锚具在钢绞线拉伸过程中锚固作用良好,说明选用的锚具符合设计要求。

#### 4.3 控制装置转换试验

从第 1 级控制状态到第 2 级控制状态的转换主要依据抗剪螺栓的剪切强度,以螺栓剪断作为第 1 级控制装置的失效标志,对螺栓进行剪切试验。

控制装置两侧分别采用 100 t 的液压千斤顶水平作用在固定装置的轴心投影位置,并将两侧千斤顶的基座支撑在反力支撑上。将软钢阻尼器从装置上拆卸,留下上部角钢通过螺栓与固定装置连接。用一个 50 t 的千斤顶直接作用在上部角钢处,施加水平向荷载,对螺栓进行剪切试验,如图 14 所示。



图 14 控制转换试验

Fig. 14 Control conversion experiment

对两种不同型号的 4.8 级普通螺栓进行分工况试验:先分别对 M18 和 M20 两种螺栓进行单根抗剪试验,再分别对 2 根 M18 和 2 根 M20 螺栓进行抗剪试验,试验结果如图 15 和表 3 所示。

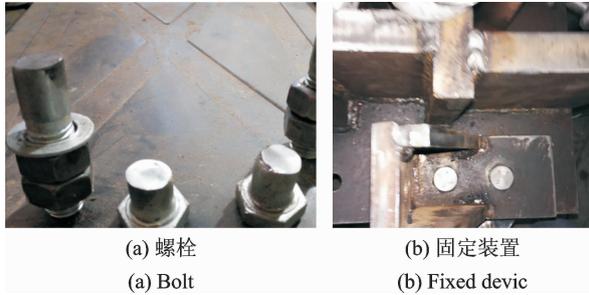


图 15 螺栓剪切破坏  
Fig. 15 Bolt shear failure

表 3 螺栓剪切试验结果

Tab. 3 Results of bolt shear experiment

螺栓型号	等级	数量	传感器力/kN	应变系数	极限剪力/kN
M18	4.8	1	312	7.0	44.57
M20	4.8	1	450	7.0	64.28
M18	4.8	2	900	7.0	128.57
M20	4.8	2	1 286	7.0	183.7

可以看出,螺栓的破坏截面平整,说明其破坏为剪切破坏,属于脆性破坏。此外,螺栓抗剪试验中一定要使螺栓紧固,以防止螺母脱丝导致螺栓产生弯曲变形,从而很难使之破坏,不能满足控制状态转换要求。试验中,除阻尼器选择 2 根 M20 螺栓进行组合连接外,均能够满足  $P_1=27.76 \text{ kN} < \text{螺栓的极限剪力} < P_2=144 \text{ kN}$  的设计要求。

### 5 有限元模拟验证

建立地震落梁两级控制装置的有限元模型,进行数值模拟,采用试验结果验证有限元模型及数值

分析结果的可靠性。由于控制装置部件较多,接触连接复杂,首先采用 SolidWorks 软件进行前期处理,绘制和装配模型,如图 16(a) 所示;然后导入 ABAQUS,选用四面体减缩积分单元 C3D20R 进行网格划分,角钢局部位置采用楔形单元完全积分,弹簧如选用实体单元很难进行网格划分。本研究选用特殊设置中的线性弹簧,刚度设定为  $20 \text{ N/mm}$ ,共施加 8 组弹簧,图 16(a) 中的下部固定端在有限元中通过施加固定约束进行模拟,如图 16(b) 所示。

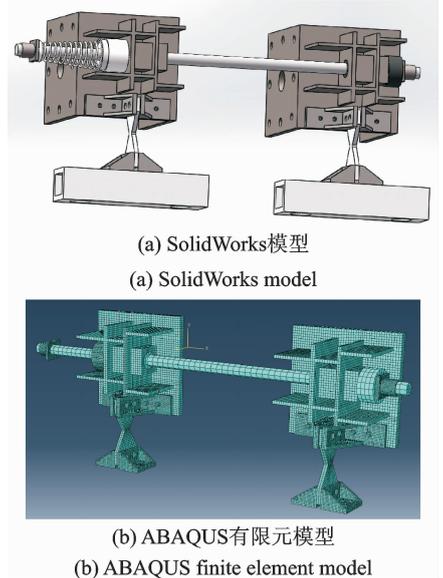


图 16 装置整体模型  
Fig. 16 Whole model of device

根据试验方案,有限元数值模拟也为 3 个部分:软钢阻尼器低周往复数值模拟、钢绞线单调拉伸数值模拟和螺栓剪切数值模拟。其中,低周往复数值模拟采用与试验加载一致的位移加载方式,如图 8 所示。软钢阻尼器数值模拟采用三折线模型,螺栓剪切数值模拟采用 ABAQUS 自带的延性金属损伤本构一剪切损伤本构。数值模拟结果与试验结果比较如图 17 所示。

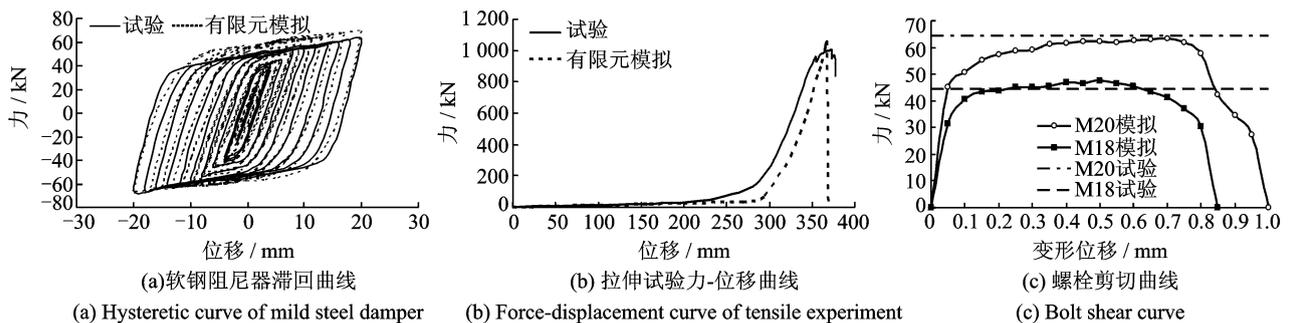


图 17 数值模拟与试验结果比较

Fig. 17 Comparison between numerical simulation and experimental results

可以看出,整体建模下的数值模拟结果与各工况下的试验结果符合较好,说明两级控制状态是独立工作,且有限元模型具有一定的可靠性,为采用数值模拟分析更多工况提供了有效保证。

## 6 结束语

笔者研发的地震落梁失效控制装置通过两级控制、耗能限位和“保险丝”构造充分体现了多级设防、耗能减震及结构分灾的抗震设计思想。该装置可实现两级控制目标,第1级控制具有耗能能力,同时提供恢复力,形成防落梁系统的首道防线。第2级控制具有拉结能力,同时提供缓冲力,形成防落梁系统的第2道防线。两级控制状态是独立工作的,第1级控制连接中的螺栓剪断实现了装置从第1级控制状态至第2级控制状态的转换。该装置实现了墩-梁连接模式和梁-梁连接模式的优势互补,可以在不过度增加桥墩附加地震作用的情况下有效地减小梁-墩相对位移,解决了落梁控制中有效位移控制和桥墩损伤之间的矛盾。

### 参 考 文 献

- [1] 于淼,刘必灯,王伟. 近断层桥梁直接震害特征分析[J]. 防灾科技学院学报, 2016, 18(2): 41-53.  
Yu Miao, Liu Bideng, Wang Wei. Damage characteristics of near-fault bridges[J]. Journal of Institute of Disaster Prevention, 2016, 18(2): 41-53. (in Chinese)
- [2] 左焯,孙广俊,李鸿晶. 中外桥梁抗震设计规范有关防落梁的比较与研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(4): 617-623.  
Zuo Ye, Sun Guangjun, Li Hongjing. Comparison and research of unseating prevention measures in seismic codes of China and foreign countries[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(4): 617-623. (in Chinese)
- [3] 张钦宇,闫聚考,许宏伟,等. 地震作用下桥梁防碰撞及防落梁措施研究综述[J]. 地震工程与工程振动, 2017, 37(2): 132-141.  
Zhang Qinyu, Yan Jukao, Xu Hongwei, et al. A review of measures for preventing bridge from pounding and unseating damages[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2017, 37(2): 132-141. (in Chinese)
- [4] 韦韩,蔚晓丹,王克海,等. 日本桥梁防落梁系统设计[J]. 世界桥梁, 2012, 40(6): 11-14.  
Wei Han, Wei Xiaodan, Wang Kehai, et al. Design of unseating prevention system in Japan[J]. World Bridges, 2012, 40(6): 11-14. (in Chinese)
- [5] 杜修力,韩强. 桥梁抗震研究若干进展[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(4): 1-14.  
Du Xiuli, Han Qiang. Research progress on seismic design of bridges[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(4): 1-14. (in Chinese)
- [6] Saiidi M, Randall M, Maragakis E, et al. Seismic restrainer design methods for simply supported bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2001, 6(5): 307-315.
- [7] Andrawes B, DesRoches R. Comparison between shape memory alloy seismic restrainer and other bridge retrofit devices[J]. Journal of Bridge Engineering, 2007, 12(6): 700-709.
- [8] Ruiz J, Hayashikawa T, Obata T. Seismic performance of isolated curved steel viaducts equipped with deck unseating prevention cable restrainers[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(2): 237-253.
- [9] Won J, Mha H, Cho K, et al. Effects of the restrainer upon bridge motions under seismic excitations[J]. Engineering Structures, 2008, 30: 3532-3544.
- [10] Galindo C, Hayashikawa T, Belda J. Damage evaluation of curved steel bridges upgraded with isolation bearings and unseating prevention cable restrainers[J]. World Academy of Science, Engineering & Technology, 2009, 59: 53-61.
- [11] Luders C, Criado M. A new design philosophy of seismic anchor elements for bridges[C]// Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake Engineering, 16WCEE. Santiago:[s. n.], 2017:4562.
- [12] 朱万旭,黄颖,杨帆,等. 地震区简支梁桥防落梁装置的设计[J]. 特种结构, 2011, 28(3): 66-70.  
Zhu Wanxu, Huang Ying, Yang Fan, et al. A new strand cable type of anti-seismic ties for bridge[J]. Special Structures, 2011, 28(3): 66-70. (in Chinese)
- [13] 孙广俊,李鸿晶,赵鹏飞. 简支梁桥地震落梁失效控制模式研究[J]. 南京工业大学学报:自然科学版, 2014, 36(02): 40-47.  
Sun Guangjun, Li Hongjing, Zhao Pengfei. Unseating failure control mode for simply supported girder bridge during earthquakes[J]. Journal of Nanjing Tech University: Natural Science Edition, 2014, 36(2): 40-47. (in Chinese)
- [14] 孙广俊,李鸿晶,左焯. 耗能分灾型地震落梁失效多级控制系统:中国, ZL 2015 1 0251851.8[P]. 2017-03-08.
- [15] 孙广俊,李鸿晶,张鹤年,等. 一种新型防落梁装置:中国, ZL 2015 2 0080614.5[P]. 2015-07-22.



第一作者简介:孙广俊,男,1979年10月生,博士后、副教授。主要研究方向为工程结构抗震与减震。曾发表《循环荷载下钢筋混凝土柱滞回性能数值模拟》(《振动、测试与诊断》2013年第33卷第2期)等论文。  
E-mail: gjsun2004@163.com