

# Research of Cable-Unseating Prevention Device

Hao Wu, Ren Luo

School of Traffic, Nanjing University of Technology, Nanjing  
Email: wuhao20081@163.com

Received: May 21<sup>st</sup>, 2013; revised: Jun. 3<sup>rd</sup>, 2013; accepted: Jun. 11<sup>th</sup>, 2013

Copyright © 2013 Hao Wu, Ren Luo. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Abstract:** The upper structure falling is one of the important reasons that cause the bridge collapsed. Beam lowering prevention measure's main function is to prevent the upper structure falling in a earthquake. This article takes a multi-scale bridge as the analysis object, using the large finite element software ABAQUS simulation to analyze it. This paper studies the effects of beam lowering prevention measure, by the way of increasing the suspended length of the girder and setting the cable-unseating prevention device. Through the analysis results, we can find out that only increase the suspended length of the girder and set the cable-unseating prevention device locality is not necessarily useful. The bridge structure should be viewed as a whole to set the beam lowering prevention measures.

**Keywords:** Upper Structure; Beam Lowering; Anti-Seismic Device; Cable

## 连梁拉索的防落梁效果研究

吴昊, 罗韧

南京工业大学交通学院, 江苏, 南京  
Email: wuhao20081@163.com

收稿日期: 2013年5月21日; 修回日期: 2013年6月3日; 录用日期: 2013年6月11日

**摘要:** 桥梁上部结构发生落梁是导致桥梁结构发生倒塌的重要原因之一。防落梁措施的主要功能就是防止上部结构在地震过程中发生落梁。本文选取某连续桥梁作为分析对象, 通过增加梁体搁置长度和设置连梁拉索装置的方法, 结合大型有限元软件 ABAQUS 进行模拟分析, 研究防落梁措施的效果。从分析结果可知, 仅增加梁体搁置长度或局部设置连梁拉索并不一定能防止落梁, 需要从桥梁结构整体防落角度来设置防落梁措施。

**关键词:** 上部结构; 落梁; 防落梁措施; 连梁拉索

### 1. 引言

桥梁结构在地震过程中会发生多种震害现象, 通过对以往地震中桥梁结构的震害现象进行总结和分析发现, 桥梁墩柱结构发生损伤的现象更为常见, 但是上部结构中的落梁震害造成的破坏是毁灭性的。汶川地震中发生倒塌的某连续桥梁, 由于其牛腿处搭接

长度不足, 并且未设置防落限位装置, 最终导致第 5 联曲线跨发生倒塌。因此合理的选取防落梁措施对于桥梁结构在地震中的抗震性能是很有必要的。本文利用有限元软件 ABAQUS 对该桥梁仿真建模分析, 并在桥梁不同部位设置了防落梁措施, 以研究防落梁措施在地震过程中的防落梁效果。桥梁整体布置示意图

如图 1 所示。

## 2. 桥梁概况

该桥梁长约为 500 m，高度约为 30.5 m，是国道 213 线紫坪铺库区淹没段改造工程，距映秀镇约 2 km，于 2004 年 12 月建成通车<sup>[1-5]</sup>。该桥梁是一座高架曲线桥，边跨曲线段呈 90 度弧形。上部结构除第三联为简支 T 梁外，其余均为连续梁；下部结构为双柱式桥墩，除 13#墩顶设置盖梁外，其余墩顶均未设置盖梁，只设置了系梁。其中，第 5 联和第 6 联之间采用牛腿的连接方式。

## 3. 落梁震害

该桥梁第 5 联在地震中发生了整体倒塌的现象，主要原因是因为第 5 联和第 6 联的动力特性差异较大，导致牛腿两侧梁体的相对位移超出了搭接长度，从而发生落梁；而牛腿处落梁后，第 5 联整体发生了顺桥向的运动，导致在伸缩缝处也发生了落梁，最终导致第 5 联曲线跨整体发生倒塌。

## 4. 防落梁措施选取

目前，国内外常用的防落梁措施主要有增加梁体搁置长度，设置限位防落装置等。该桥梁第 13#墩墩顶盖梁宽度为 170 cm，不能满足《公路桥梁抗震设计细则》(JTJ/TB02-01-2008)<sup>[6]</sup>中关于梁体搁置长度的要求；牛腿处的搁置长度不足并且未设置限位防落装置，因此本文对该桥梁伸缩缝处盖梁进行加宽，并在桥梁结构中设置限位防落装置，研究防落梁措施的效果。

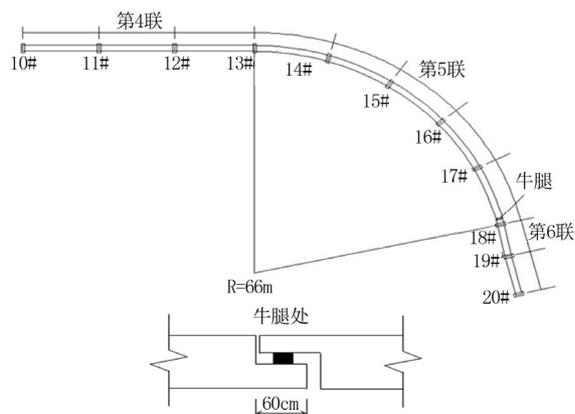


Figure 1. Instance of the overall layout  
图 1. 实例整体布置图

### 4.1. 梁体搁置长度

我国《公路工程抗震设计规范》(JTJ004-89)<sup>[7]</sup>中关于梁体的搁置长度取值为  $a \geq 50 + L$  (L 为桥梁跨径)，通过对以往震害资料的研究表明，对于较为常见的中小型桥梁来说，a 值相对不足。因此，《公路桥梁抗震设计细则》(JTJ/TB02-01-2008)<sup>[6]</sup>参照日本桥梁抗震设计新规范中的取值采用  $a \geq 75 + 0.5 L$ 。a 值对照表如表 1 所示。

### 4.2. 连梁拉索

拉索式连梁装置与其他连梁限位装置相比，拉索式连梁装置对于墩顶宽度没有要求，可以设置在梁体和梁体之间，也可以设置在梁体和墩柱之间，并且拉索式连梁装置可以处于松弛状态，从而不影响桥梁正常工作状态。本文采用 W/2 法对连梁拉索进行设计，W/2 法允许主梁在地震中脱离支座，由预应力钢绞线或钢棒(简称 Cable)悬吊起来，Cable 上的作用力为桥跨重量的一半，即上部结构的恒载反力  $R_d$ <sup>[8]</sup>。连梁拉索的设计过程如下：

#### 4.2.1. 设计承载力 $H_F$

连梁拉索是在超出了预期强度的大地震(即超出 L2 等级的地震)时发生作用，因此在设计拉索时，其设计地震力应当大于 L2 等级的水平地震力，即：

$$H_F = 2\beta K_h R_d \quad (1)$$

式中： $H_F$ ——连梁拉索的设计地震力； $\beta$ ——桥梁地震荷载的重要性系数； $K_h$ ——L2 等级的水平地震系数； $R_d$ ——恒载作用下的支座反力。

#### 4.2.2. 拉索的容许拉力 $P_a$

$$P_a = P_y \quad (2)$$

式中： $P_y$ ——连梁拉索的屈服拉力。

#### 4.2.3. 拉索数量确定

假定设置的连梁装置平均承担设计地震荷载，

Table 1. Comparison table of value a  
表 1. a 值对照表

跨径 L (m)	13	16	20	25	30
《公路工程抗震设计规范》(JTJ004-89)	63	66	70	75	80
《公路桥梁抗震设计细则》(JTJ/TB02-01-2008)	76.5	78	80	82.5	85

则:

$$P = H_F / n \leq Pa \quad (3)$$

式中:  $P$ ——每根连梁拉索承受的地震荷载;  $n$ ——联结钢棒或拉索的数量。

#### 4.2.4. 连梁装置的设计移动量

连梁装置设计位移的最大值的设定, 主要要求是对桥梁结构的破坏程度最轻, 同时不能大于梁体的搁置宽度, 设计位移最大值公式(4)。在大地震发生时, 采用橡胶支座的桥梁, 支座变形超出了自身的变形能力的最大值, 因此, 要求连梁装置设计位移的最大值不能小于橡胶支座自身变形能力的最大值。

$$\text{Max}L \leq S_F \leq C_F S_E \quad (4)$$

式中:  $L$ ——橡胶支座容许剪切变形量;  $S_F$ ——为连梁装置的设计移动量; 对于橡胶支座的允许最大剪切变形可取  $\gamma = 2.5$ , 即连梁装置的最小移动量为  $S = 2.5 H$ ;  $C_F$ ——为连梁装置的设计移动系数, 一般可取 0.75, 但当梁体搁置宽度  $S_E$  数值较大或者变形可能会导致支承能力受到影响及维护理等的困难时, 可小于 0.75。

### 5. 有限元模型

有限元模型的建立过程中, 材料本构关系的选取尤为重要, 特别在复杂的地震荷载作用下。为了比较好的模拟混凝土在地震荷载作用下特有的复杂破坏过程, 本文运用的混凝土本构模型为 Jeeho Lee 的混凝土塑性损伤模型<sup>[9]</sup>, 结构中钢筋应力 - 应变关系采用三折线模型。

#### 1) 混凝土塑性损伤模型

混凝土损伤塑性模型是使用各向同性损伤弹性结合各向同性拉伸和压缩塑性的模式来表示混凝土的非弹性行为。这是一个基于塑性的连续介质损伤模型。此模型模拟混凝土结构在周期荷载或动荷载作用下的破坏有比较好的效果。

#### 2) 钢筋材料模型

钢筋本构模型采用应力 - 应变为三折线模型。由于计算量比较大, 所以本模型选取最右端的三联(第 4 联 + 倒塌的第 5 联 + 第 6 联)建立该桥梁有限元计算模型, 桥梁结构有限元模型如图 2 所示。

#### 3) 时程分析

有限元 ABAQUS 软件中 ABAQ-US/Explicit 可以进行显式动态分析, 适用于求解非线性动力学问题, 特别是模拟短暂、瞬时的动态问题, 如跌落、爆炸、冲击等。另外, 对于处理接触条件高度非线性的准静态问题也非常有效, 本模型采用的是国家强地震台中心 2008 年 5 月 12 日 14 分 04 秒汶川地震在汶川卧龙台获得的加速度记录。动力时程分析法是直接地将地震波作用在结构支撑点(边界), 可由计算得到结构每一时刻的地震响应的方法。输入地震波时间为 0~50 s。

### 6. 分析结果对比

#### 6.1. 梁体搁置长度

该桥梁第 4 联梁体长度 25 m, 因此, 考虑将第 13#墩顶盖梁加宽至 180 cm。盖梁加宽前后, 桥梁的地震反应如图 3 所示。

从图 3 可以看出: 原结构盖梁未加宽, 在 33 s 时, 伸缩缝处发生了落梁; 对盖梁进行加宽后, 33 s 时, 伸缩缝处并未发生落梁, 但梁体搁置长度已经所剩无几, 随后即发生了落梁。

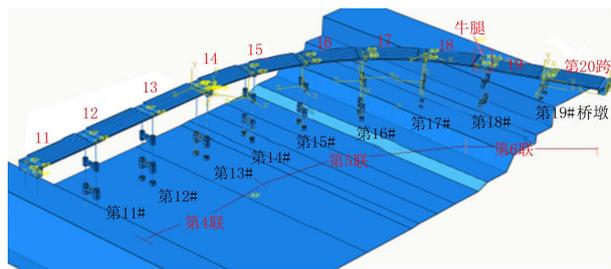


Figure 2. Finite element model of the 4th - 6th union of Baihua Bridge  
图 2 第 4-6 联有限元模型

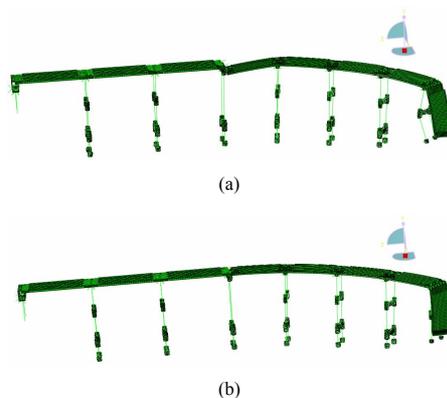


Figure 3. Seismic response of bridge at 33 s; (a) Cap beam not widening; (b) Cap beam widening  
图 3. 33 s 时桥梁地震响应; (a) 盖梁未加宽; (b) 盖梁加宽

小结：实例中对 13#墩顶盖梁进行加宽后，第 14 跨梁体落梁时间有所延迟，但是依旧发生了落梁。可见，仅仅对梁体搁置长度进行改进，并不一定能满足防落梁的要求，须结合限位措施或连梁装置来提高桥梁抗震防落性能。

## 6.2. 连梁拉索效果

对于该桥梁，由于牛腿处发生了落梁，导致了第 5 联曲线跨的整体倒塌。为了研究连梁拉索在防落梁方面的作用效果，在实例桥梁中设置连梁拉索，具体工况如下：

工况一：在 13#墩顶伸缩缝处设置连梁拉索；

工况二：在牛腿处设置连梁拉索；

工况三：在伸缩缝左右两片梁间、牛腿处设置连梁拉索；

工况四：在伸缩缝左右两片梁间、牛腿处以及 10#和 20#桥台处设置连梁拉索；

### 6.2.1. 工况一

在伸缩缝处设置连梁拉索(工况一)前后，该桥梁地震响应变化如图 4 所示。

通过图 4 可以看出：原结构的伸缩缝处未设置拉索，由于牛腿处的落梁，导致第 5 联整体产生向顺桥向运动的趋势，在 33 s 时，第 14 跨梁体位移超过了梁体的搁置长度，发生了落梁；而第 13 跨梁体和第 14 跨梁体设置了连梁拉索后，第 14 跨梁体未发生落梁，连梁拉索起到了防落梁的效果，但是在连梁拉索作用下第 4 联整体也发生顺桥向的运动，最终 10#桥台处的梁体移位超过了搁置长度限值，产生落梁，并最终导致第 4 联和第 5 联整体倒塌。可见，牛腿处的落梁是导致第 5 联发生运动并导致倒塌的主要原因。因此，尝试在牛腿处设置连梁拉索，研究防落梁拉索的效果。

### 6.2.2. 工况二

在牛腿处设置连梁拉索前后，该桥梁地震反应变化如图 5 所示。

通过图 5 可以看出：原结构的牛腿处未设置拉索，20.5 s 时，原结构牛腿处发生了落梁，由于牛腿处的落梁，导致第 5 联整体产生向顺桥向运动的趋势，在 33 s 时，第 14 跨梁体位移超过了梁体的搁置长度，

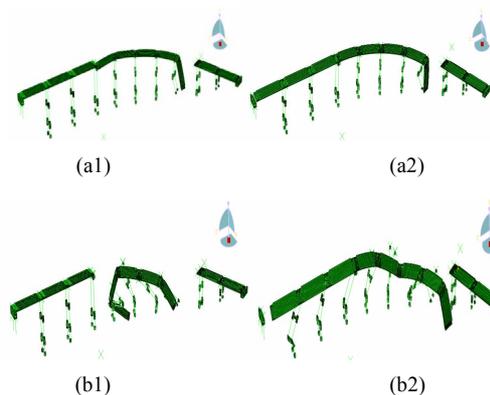


Figure 4. The whole bridge seismic response; (a1) Original structure; (a2) Working condition one; (b1) Original structure; (b2) Working condition one

图 4. 全桥地震反应变化; (a1) 原结构; (a2) 工况一; (b1) 原结构; (b2) 工况一

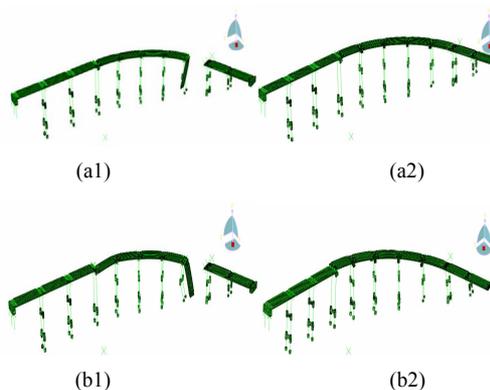


Figure 5. The whole bridge seismic response; (a1) Original structure; (a2) Working condition two; (b1) Original structure; (b2) Working condition two

图 5. 全桥地震反应变化; (a1) 原结构; (a2) 工况二; (b1) 原结构; (b2) 工况二

发生了落梁；而在牛腿处设置了连梁拉索后，在 20.5 s 时，牛腿处并未发生落梁，桥梁整体结构完好，连梁拉索起到了防落梁的作用。但是 33.5 s 时，第 20#桥台处，由于第 5 联整体的顺桥向运动，导致第 6 联整体被第 5 联牵引，第 20 跨梁体与桥台处的相对位移超出了搁置长度，发生了落梁最终导致第 5 联和第 6 联整体发生倒塌。

小结：通过工况一可见，在伸缩缝处设置连梁拉索后，不能避免牛腿处的落梁；工况二在牛腿处设置连梁拉索，牛腿处未发生落梁，但是第 20 跨梁体发生了落梁。仅仅在伸缩缝或者牛腿处设置连梁拉索，并不能防止落梁。

### 6.2.3. 工况三

在伸缩缝处和牛腿处均设置了连梁拉索以后，百

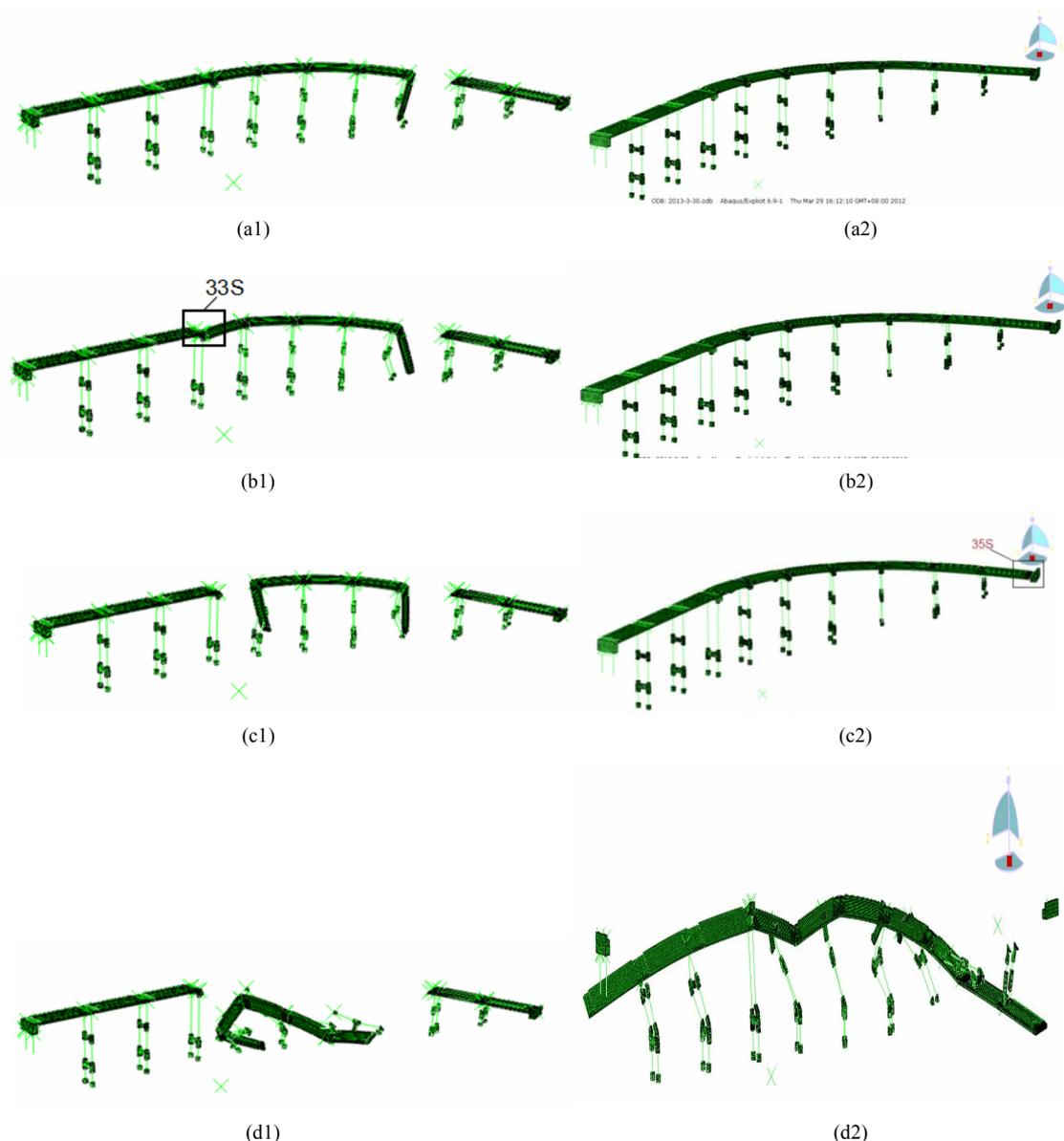


Figure 6. The whole bridge seismic response; (a1) Original structure; (a2) Working condition three; (b1) Original structure; (b2) Working condition three; (c1) Original structure; (c2) Working condition three; (d1) Original structure; (d2) Working condition three;  
 图 6. 全桥地震反应变化; (a1) 原结构; (a2) 工况三; (b1) 原结构; (b2) 工况三; (c1) 原结构; (c2) 工况三; (d1) 原结构; (d2) 工况三

花大桥的地震反应变化如图 6 所示。

由图 6 可知：1) 由于在牛腿处设置了连梁拉索，牛腿处在 20.5 s 时并未发生落梁；2) 伸缩缝处设置了连梁拉索后，也起到了防落梁的作用，33 s 时，工况三的伸缩缝处并未发生落梁；3) 由于第 5 联和第 6 联的质量及动力特性相差很大，设置了连梁拉索以后，第 6 联发生了向第 5 联运动的趋势，最终第 6 联的位移超出了 20#桥台的搭接长度，在 35 s 时发生了落梁；4) 第 6 联落梁以后，桥梁整体有向外侧转动的趋势，最终导致上部结构整体向外侧运动，发生倒塌。

小结：通过工况三可见，在牛腿和伸缩缝处设置了连梁拉索之后，对牛腿处和伸缩缝处的落梁时间有所延缓，但是由于第 6 联质量相对第 5 联较小，最终导致第 20#桥台处发生了落梁，最终导致桥梁整体倒塌，可见，设置连梁拉索不能仅仅对牛腿处及伸缩缝处进行布置，需要针对桥梁整体来布置连梁拉索。

#### 6.2.4. 工况四

在伸缩缝处和牛腿处以及 10#和 20#桥台处设置了连梁拉索以后，该桥梁的地震反应变化如图 7 所示。

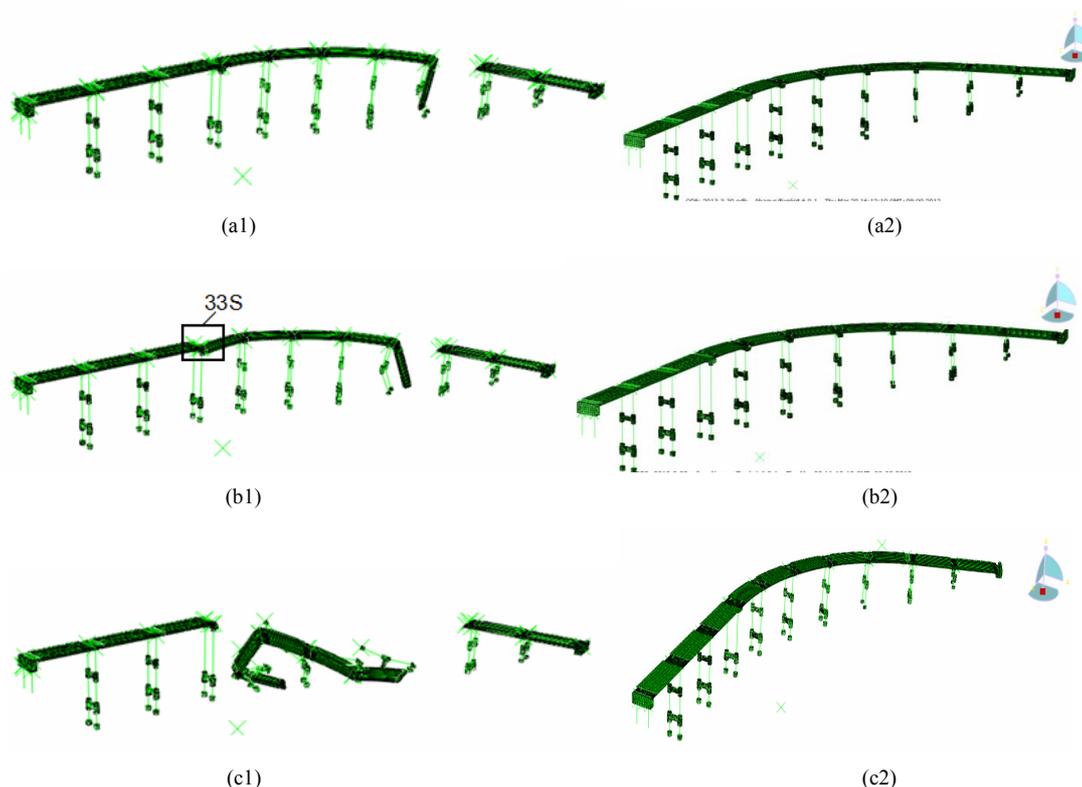


Figure 7. The whole bridge seismic response; (a1) Original structure; (a2) Working condition four; (b1) Original structure; (b2) Working condition four; (c1) Original structure; (c2) Working condition four

图 7. 全桥地震反应变化; (a1) 原结构; (a2) 工况四; (b1) 原结构; (b2) 工况四; (c1) 原结构; (c2) 工况四

由图 7 可见：在伸缩缝和牛腿处及 10#和 20#桥台处设置了连梁拉索之后，桥梁伸缩缝及牛腿并未发生落梁，10#与 20#桥台处也未发生落梁，20#桥台处梁体和桥台发生了相对位移，但是未超出搭接长度，未发生落梁，桥梁整体结构完好。

## 7. 总结

1) 对该桥梁 13#墩顶盖梁进行加宽设计后，虽然落梁时间有所延缓，但是效果并不明显，并不能防止落梁的发生，可见仅仅增加梁体搁置长度的方法并不一定能防止落梁。

2) 在伸缩缝处设置了连梁拉索之后，伸缩缝处未发生落梁，但由于牛腿处落梁产生的顺桥向牵引作用，10#桥台处发生了落梁，可见，牛腿处的落梁是导致伸缩缝处发生落梁的主要原因。

3) 对牛腿处设置连梁拉索之后，牛腿处未发生落梁，伸缩缝处也未发生落梁，但是由于第 6 联质量远小于第 5 联，最终导致 20#桥台处发生落梁，第 5 联和第 6 联发生整体倒塌。可见，连梁拉索两侧梁体的

质量不宜相差过大。

4) 在牛腿处和伸缩缝处均设置连梁拉索后，牛腿和伸缩缝处未发生落梁，但与仅在牛腿处设置连梁拉索类似，20#桥台处发生落梁，最终桥梁整体发生倒塌。

5) 在牛腿和伸缩缝处及 10#和 20#桥台处均设置连梁拉索后，牛腿处和伸缩缝处未发生落梁，10#和 20#桥台处也未发生落梁，20#桥台处的梁体和桥台产生了相对位移，但是未超过搭接长度，桥梁结构整体完好，未发生落梁和倒塌的现象。可见，连梁拉索的设置须从桥梁结构整体防落的角度出发，不能只在桥梁结构局部设置防落梁措施。

## 参考文献 (References)

- [1] 庄卫林, 刘振宇, 蒋劲松等. “5.12”汶川地震公路桥梁震害分析及对策研究[J]. 公路, 2009, 5: 129-138.
- [2] 蒋劲松. 汶川大地震百花大桥震害调查分析[J]. 桥梁建设, 2008, 6: 41-44.
- [3] 范立础, 李建中. 汶川桥梁震害分析与抗震设计对策[J]. 公路, 2009, 5: 122-128.

## 连梁拉索的防落梁效果研究

- [4] 李乔, 赵世春. 汶川大地震工程震害分析[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2008.
- [5] 罗韧, 许慧荣. 汶川地震中百花大桥倒塌模拟分析[C]. 第八届全国地震工程会议, 重庆, 2010年12月24日.
- [6] 中华人民共和国交通运输部. JTG/T B02-01-2008 公路桥梁抗震设计细则[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [7] JTJ004-89. 公路工程抗震设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1990.
- [8] 王卫峰. 公路桥梁耗能型连梁装置的研究[D]. 长安: 长安大学, 2005.
- [9] 张劲等. ABAQUS 混凝土损伤塑性模型参数验证[J]. 建筑结构, 2008, 38(8): 127-130.