

[文章编号] 1002-8412(2009)03-0001-08

# 中美规范比较探讨桥梁结构抗震体系

殷鹏程, 叶爱君 (同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**[摘要]** 中国和美国都即将推出新一代的桥梁抗震设计规范。经过多次修订的美国桥梁抗震规范是一套真正意义上的基于性能要求的结构设计规范,代表了未来结构设计规范的发展方向。《AASHTO桥梁抗震指南》中第一次明确提出了合理抗震体系的概念,并且通过传力路径上的抗震单元以及位移限制和连接措施保证了抗震体系基本特征的实现。从美国规范中汲取经验、吸收先进的研究成果,并对我国的规范进行适当的修订和调整是有着重要意义的。本文在对两本规范中与桥梁抗震体系相关内容进行分析比较的基础上,通过对合理抗震体系的特征和各组成部分进行系统剖析,以期阐明桥梁抗震体系的合理设计,并为我国新抗震规范的修订以及桥梁工程师的抗震设计提供参考。

**[关键词]** 桥梁;抗震规范;抗震体系;抗震单元;位移限制和连接措施;AASHTO

[中图分类号] U442.5\*5 [文献标识码] A

## Discussion on Bridge Earthquake Resistance System from Comparison Work on the Codes of China and America

Yin Peng-cheng, Ye Ai-jun (State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Both of China and America are going to publish the new bridge seismic design specifications. The American bridge seismic specification which has been revised many times is a real set of structure design specifications on the basis of performance requirement. It represented the developing direction of the structure design specification in the future. The AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design provides the reasonable Earthquake Resistance System explicitly for the first time. It also provides Earthquake Resistance Element on the load path and displacement restraint and connection means to achieve the basic characteristic of Earthquake Resistance System. Therefore, it's a matter of great significance to draw experience and absorb the advanced research results into our country's specifications revising work from USA's. Based on the analysis and comparison work on the two codes as mentioned above about the associated content of earthquake resistance system of bridge structure, the reasonable design of bridge earthquake resistance system is clarified by systemically analyzing the characteristics and components of reasonable earthquake resistance system, and the reference is provided for the revision of new bridge seismic design specifications and the bridge seismic design of bridge engineer of our country.

**Keywords:** bridge; seismic design codes; earthquake resistance system; earthquake resistance element; displacement restraint and connection means; AASHTO

### 1 引言

桥梁抗震设计规范是一个国家桥梁抗震设计的依据,对桥梁的抗震安全至关重要。因此,各个国家都会根据最新的抗震研究成果和震害经验,不断地对抗震设计规范进行修订。随着我国经济实力的增强和交通事业的迅猛发展,现行的《公路工程抗震设

计规范》(JTJ0047-89)已表现出越来越多的不适应性。目前,《公路桥梁抗震设计规范》正在修订中,已完成征求意见稿(以下简称为“中国抗震规范”),对现行规范做了大量修改,而且在抗震设计思想和方法上都有很大的变化。今年我国发生了5.12汶川大地震,无疑会加速这一版规范的颁布。而工程抗震理论和技术一直处于世界领先地位的美国,最近也根据NCHRP 20-07/Task 193 Task 6报告,出版了《The AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design》(以下简称为“AASHTO抗震指南”),且

[收稿日期] 2008-09-02

[基金项目] “十一五”国家科技支撑计划(2006BAC04B01)

以后将被增补到《AASHTO LRFD Bridge Design Specifications》中。

总体来说,“中国抗震规范”和“AASHTO 抗震指南”在许多方面是一致的。两者都给出了明确的桥梁抗震性能目标,提出了具体的桥梁抗震设防标准;都采用了基于位移的设计方法,并结合能力设计原理进行桥梁的抗震设计;都提出了具体的抗震验算指标,并给出了弹性反应谱分析、非线性时程分析、pushover 分析等基本一致的需求和能力计算方法;都给出了较为详细的构造措施,以确保延性耗能设计意图的实现等。

但与“中国抗震规范”相比,“AASHTO 抗震指南”的一个很大进步在于:明确规定了桥梁的合理抗震体系(Earthquake Resistance System,下面简称为ERS),而且规定,对所有属于SDC C和D(SDC,抗震设计类别,根据设防地震周期1s处的设计谱加速度系数SD1而进行的抗震风险分类)的桥梁都必须进行抗震体系的确认,作为桥梁抗震设计中的关键环节,以满足桥梁的生命安全性能要求。

桥梁结构的抗震体系对于桥梁的抗震性能是最为重要的。因此,本文重点讨论桥梁结构的抗震体系,基于对两本规范中与桥梁抗震体系相关内容的分析比较,对合理抗震体系进行系统剖析,包括合理抗震体系的基本特征、抗震体系传力路径上的抗震单元、以及保证桥梁整体性的位移限制和连接措施,以期阐明桥梁抗震体系的合理设计,供桥梁工程师们参考。

### 2 中美规范对抗震体系的不同规定

“AASHTO 抗震指南”根据业主对桥梁的预期性能要求,将ERS分为三类,即容许使用的ERS,经过业主同意后容许使用的ERS以及不建议在新桥上使用的ERS。其中每一类ERS又有相应的抗震单元(Earthquake Resistance Element,下面简称为ERE)与之配套。ERE是ERS的组成部分,并负责满足ERS的功能要求。抗震单元也被分为容许使用、经过业主同意后容许使用、以及不建议在新桥上使用三类。而且规范规定,对属于容许使用类型的ERS,它的所有抗震单元也应属于容许使用类型,若主要抗震单元不被建议使用,则整个体系也被认为是不建议使用的。

“AASHTO 抗震指南”中规定的容许使用的ERS如图1所示,分别针对连续刚构桥、连续梁桥以及简

支梁桥三种桥型。

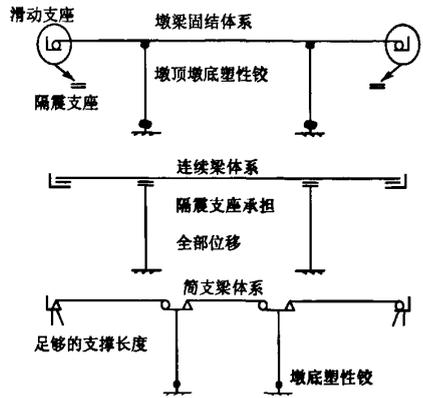


图1 AASHTO 抗震体系

Fig.1 AASHTO Earthquake Resistance System

对于连续刚构桥,应使塑性铰位于墩顶和墩底或对墩柱进行弹性设计;对连续梁桥,可在墩柱和桥台处都使用隔离支座,以承担全部的位移;在多跨简支梁桥中,应使简支梁具有足够的支承长度,且塑性铰位于墩底或对墩柱进行弹性设计。对于桥台,可选择桥台抗力不作为ERS一部分,且允许横向剪力键脱离。也可以选择桥台抗力作为ERS一部分,桥台在设计地震下处于弹性状态,但纵向被动土压力应小于规范规定被动土抗力的0.7倍;在桥台纵向可使用普通支座,且允许桥台背墙被撞后脱离,也可在桥台处使用隔离支座。

而“中国抗震规范”没有提出明确的抗震体系,但也给出了相关的一些内容。如规定:进行梁桥抗震设计时,沿横桥向,单柱墩底部、双柱墩或多柱墩端部为潜在塑性铰区域;沿纵桥向,连续梁桥、简支梁桥墩柱底部,连续刚构桥墩柱端部为潜在塑性铰区域。

可见,“中国抗震规范”只讨论了不同桥型所对应的塑性铰位置的布置和选择,而《AASHTO 抗震指南》则更强调ERS的整体性,强调整个传力路径上抗震单元的配套使用。

### 3 合理抗震体系的基本特征

“AASHTO 抗震指南”给出的合理抗震体系具有两个特征:①应提供一个可靠且不间断的传力路径将地震荷载传入周围土层中,②应提供充分的能量耗散和(或)限制方法来有效控制由地震产生的位移,即保证桥梁的整体性。这两个特征构成了对

ERS 的评判标准并以此统揽抗震设计的全局。

### 3.1 传力路径不间断

桥梁结构中的地震荷载传力路径,是由地震作用产生的上部结构惯性力通过支座、梁柱节点、剪力键等传递到墩柱和桥台结构中,再通过基础节点传递到基础中并扩散到周围土层中。对需要桥台结构承担纵向荷载的设计,还要通过连续的上部结构将惯性力传递到桥台支座以及桥台背墙,然后传递到台后填土中。

明确了传力路径,还要把握传力路径的实质为不间断。由于桥梁的主要构件处若发生了不能使地震荷载有效传递的破坏就可能致使整座桥梁的交通中断甚至完全坍塌。为了保证桥梁震后的有效服务性,不间断实际上就是要求桥梁结构的主要构件和节点在地震作用下不能发生威胁到将惯性力顺利传递回土层的严重破坏。换言之,就是需要下部结构能够抵抗上部结构惯性力。按早期的强度设计方法,就需要保证结构抗力大于预期可能发生的最大地震动所能激起的最大弹性地震力。但对于大量的普通桥梁,这种设计方法无疑会造成巨大的材料浪费,也不太现实。所以需要采用考虑结构塑性变形能力的延性设计方法,表现在结构中就要求通过各种延性耗能单元的使用来控制结构的强度发展。对于需要保证在地震作用下弹性工作的结构还要进行减隔震设计。

为了保证桥梁传力路径不间断,就需要对传力路径上所有的抗震单元提出具体的性能要求。

### 3.2 桥梁保持整体性

仅仅保证结构的传力路径不间断还不足以保证桥梁的抗震安全性,历史震害一再表明了桥梁整体性的重要性。因此,还需要采用适宜的连接措施以防止落梁等影响结构整体性的严重破坏形式,如采用合适的能量耗散和限制方法控制结构的位移。特别是对于减隔震结构,隔震支座的使用会增加体系的柔性,通过延长桥梁的周期降低了结构的地震力,从而使下部结构保持弹性工作成为可能,但周期的延长必然会伴随结构位移的增大。为了控制结构过大的变形,需在结构中引入能量耗散装置,以增加结构阻尼,使上部结构位移减少,从而减少墩柱的延性位移需求。除了能量耗散装置外,桥梁还需要使用限位装置或构造来限制或适应上部结构的纵向和横向位移。

## 4 保证传力路径连续的抗震单元

抗震单元是抗震体系中最为核心的组成部分,是实现传力路径可靠性和不间断要求的主要结构部件。根据桥梁的预期行为特征,AASHTO 桥梁抗震指南中给出了三种综合抗震设计策略,每种设计策略都有相应的抗震单元来满足设计要求。

表 1 抗震设计策略

Table 1 Global Seismic Design Strategies

综合抗震设计策略	特征
一型,延性下部结构和完全弹性上部结构	包括传统的墩柱内、墩墙内的塑性铰以及调动桥台后填土的被动土抗力来限制惯性力。另外还包括地面下基础的塑性铰。
二型,完全弹性下部结构和延性上部结构	仅适用于钢上部结构。通过钢梁-板桥上部结构的交叉框架的一部分作为延性单元来达到预期的延性。这是一项新的发展起来的技术,还没有得到广泛的使用。
三型,在上下部结构间存在保险机制使结构整体保持为弹性	包括隔震结构和能量耗散装置的结合。用于控制惯性力在上下部结构间的传递,并在一次大地震中提供限制能量增大和相关位移的机制。

由于二型以及三型抗震设计策略中的抗震单元较少,且一型抗震设计策略仍是现在主要使用的抗震设计策略,所以下文将详细讨论一型抗震单元,即传统的钢筋混凝土墩柱桥梁的抗震单元。

### 4.1 抗震单元的分类

如前所示,“AASHTO 抗震指南”按抗震单元的使用方式,将抗震单元分为三类,如表 2 所示。

值得注意的是,需经业主同意后使用的这种单元的使用是“AASHTO 抗震指南”做出的非常重要的调整,即对可能产生不易检测和修复的塑性变形的单元不再简单的规定不允许使用,而是需要在业主的授意下进行更高层次的额外分析,在充分掌握评估单元的变形性能的情况下允许使用。即使对于第三种 ERE,规范也只是不建议在新桥上使用,但是同时又规定,在不影响到桥梁的最低生命安全性能的情况下,在充分考虑了各种潜在的行为模式以及能够抑制各种潜在的不被期望的破坏机制,那么在业主同意的情况下也可以允许使用。这就给业主提供了很大的选择空间,并充分考虑了业主的需要,即要

求业主提供预期的损伤水平,实际上由业主考虑桥梁的重要性并选择可以承担的风险水平,通过耗能机制和耗能部位的选择来得到体现,也就充分体现了对桥梁的最优抗震性能即保障震后服务性的考虑,反应了基于性能设计的内涵。这一点是非常值得我国规范借鉴的。

表 2 抗震单元分类

Table 2 Earthquake Resistance Element Sort

抗震单元	特征
容许使用	桥梁损伤控制在最小范围,且所有重大塑性变形都应是延性的、且位于易于检测和修复的位置,可保障桥梁震后的修复工作、以迅速恢复桥梁的通行能力。
需同业主协商使用	塑性变形发生于不容易检测和修复的位置,但是仍能有效进行耗能,并能保证桥梁震后有限的通行能力。
不建议在新桥上使用	破坏会直接影响到桥梁震后的服务性

为了阐述方便,本文将一型抗震单元归类为墩柱、基础和桥台抗震单元分别进行阐述。

### 4.2 墩柱单元

墩柱单元的底部和端部的塑性铰是常用的能量耗散单元,由于其易检测和易修复性,在“AASHTO抗震指南”中属于容许使用单元。

在“AASHTO抗震指南”和“中国抗震规范”中都给出了常用的墩柱塑性铰单元。但在 AASHTO 中,还存在一些在特殊情况下使用的单元,如图 2 中所示的喇叭式墩顶分离缝、桩头铰接、墩底铰接等,并且给出了详细的构造规定,这些仍然是值得我国规范借鉴的。

墩底铰接单元一般在墩柱底部截断所有柱中的纵向钢筋,然后在柱中央提供竖向铰钢筋,在墩柱四周放置伸缩缝材料来减少传力键的尺寸,以减少传入基础和基础中的荷载。对这种构造措施需要注意两点:①对于多柱式桥墩,若梁墩固结,则允许在墩底铰接,但若为支座支承上部结构,则不适合采用柱底铰接来减少基础地震力;②在设计中,通常认为这种构造措施是完全铰即抗弯能力为零,而在确定能力,保护的剪切荷载或评价现有桥梁时,应注意此构造仍可传递一定的弯矩,且具备传递相当大剪力的能力。

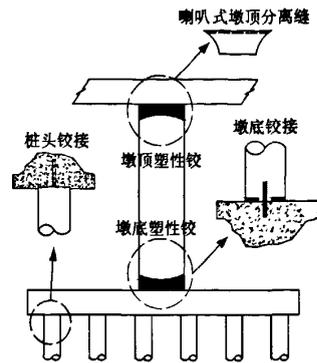


图 2 墩柱抗震单元

Fig.2 Pier and Column Element

喇叭式墩柱一般是为了美学要求,但若需要在墩顶形成塑性铰时,喇叭式截面会增加墩柱的超强弯矩。所以“AASHTO抗震指南”中规定应将喇叭截面的顶面同盖梁底面水平分离,从而减少了柱中的地震剪力需求以及与其相联系的能力,保护构件的内力需求。对 SDC C,最小缝宽应为 4in。对 SDC D,分离缝尺寸应保证其不会在地震中闭合。只有在 SDC A 和 B 中,才可以使用轻微配筋的整体式扩大墩柱,且扩大墩顶的几何形式应尽可能纤细。

### 4.3 基础单元

由于基础单元的损伤不能够直观的检测,且修复比较困难和昂贵,所以基础单元在抗震设计中往往被设计为能力保护构件。但“AASHTO抗震指南”指出,当液化场地可能发生侧向滑移时,在这种情况下让桩达到一个更高的性能水准是非常困难且耗资巨大的。所以规范规定对于 SDC 的潜在液化场地,可考虑在满足生命安全性能目标下在基础中形成塑性铰。这种在基础中产生塑性损伤的单元一般被归类为经业主同意后容许使用的单元。

“AASHTO抗震指南”中给出了若干扩大基础和桩基础的抗震单元。分别如图 3 和图 4 所示。在本文给出的基础抗震单元中,只有满足倾覆条件的扩大基础属于容许使用的抗震单元,其余单元都属于需同业主协商后容许使用的抗震单元。

对于硬土或者岩石条件,采用扩大基础最为经济。只要墩柱尺寸能保证重力提供的抗力超过基脚的倾覆弯矩,就能保证塑性铰在墩柱底部形成。

对于不满足倾覆条件的扩大基础,经业主同意后,允许其在较低的地震侧向荷载作用下将趋于两侧摆动而不在柱底产生塑性铰,以大大增加质量中

心的侧向反应位移为代价来保护墩柱免遭地震破坏,其作用同隔震支座类似。且当使用这种抗震单元时,应充分考虑其对系统行为的影响。无论是单墩或者更多的墩发生摆动,都需要考虑全桥或框架系统的整体动力效应,且应考虑基础的岩土能力,包括潜在的沉降评估来保证这种不良变形不会危害桥梁系统的抗力和稳定性。

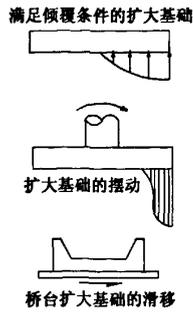


图 3 扩大基础抗震单元  
Fig.3 Spread Footing Element

在模拟斜桩在地震荷载下的反应时,塑性机制可能是由岩土强度而不是桩的结构强度所控制的。

需要注意的是,这里桩的塑性变形都被限制在有限的延性反应之内,即延性需求  $\mu_D$  要求小于 4,以获得较好的抗震性能。

4.4 桥台单元

桥台抗震单元是“AASHTO 抗震指南”中非常有特色的抗震单元,这一点在“中国抗震规范”中也没有考虑。桥台按上部结构与桥台的连接方式分为整体式桥台以及支座支承的座式桥台。规范中给出了两种属于容许使用类型的座式桥台抗震单元。此外,还可以选择是否将桥台作为 ERS 的一部分。

在地震荷载下,作用于桥台边墙的土压力从静止状态转变到以下两种可能的状态的一种:(1)当墙离开回填土运动时动力的主动压力状态;(2)当桥梁惯性力推动墙向填土内运动时的被动压力状态。控制土压力条件依赖于桥台墙、上部结构的位移量以及桥梁/桥台的构造。对于座式桥台,当伸缩缝宽度足以承担在背墙和上部结构间的往复运动时,在背墙上的地震引起的土压力,应该被视为主动土压力状态。但当伸缩缝处宽度不足以承担往复运动时,背墙承受上部结构传递的纵桥向地震力,而在背墙后的土压力接近于一个更大的被动压力荷载状态。在这里,桥台背墙可以被设计为弹性的抵抗预期的冲击力,也可以被制定为保险,即在强震作用下发生破坏脱离桥台,发挥耗能作用。应当认识到,这种破坏在震后是可以采取临时措施来满足紧急车辆的通行要求的,尽管震后修复更为昂贵。

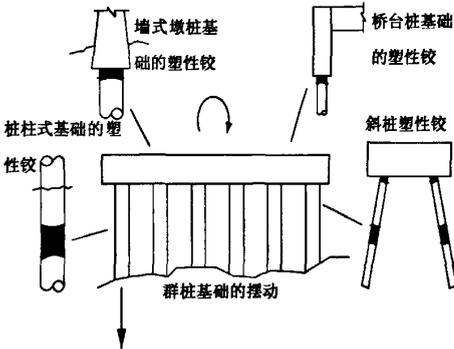


图 4 桩基础抗震单元  
Fig.4 Pile Foundation Element

另外,在扩大基础中一般需要保证由柱的塑性超强所建立的剪力需求应小于基础的滑动抗力,以防止基础的滑动破坏。但在桥台扩大基础中,经业主同意后允许桥台扩大基础发生滑动来限制力的传递,且其运动应限制在相邻排架位移能力之内。

在群桩系统中,经业主同意后允许最外层桩及内侧部分桩在地震荷载下下陷和上拔。实际上类似于扩大基础的摇摆反应,以达到结构耗能的目的。

对于桩柱式基础,可避免采用桩基础-承台体系时在墩台固结处形成较大的弯矩。桩柱式基础最大弯矩形成于 1.5~2.5 倍桩径的深度。但由于桩柱式基础柔性较大,结构质量中心处的弹性位移也很大,导致塑性铰截面的转动延性需求与结构位移延性需求的比值较高。

在竖桩支承的桥台中,若桥台抗力作为 ERS 的一部分,桩基础就要被设计为承担地震位移,则整体式桥台桩或没有横向保险的桩支撑的座式桥台处的桩的塑性位移就是可接受的。

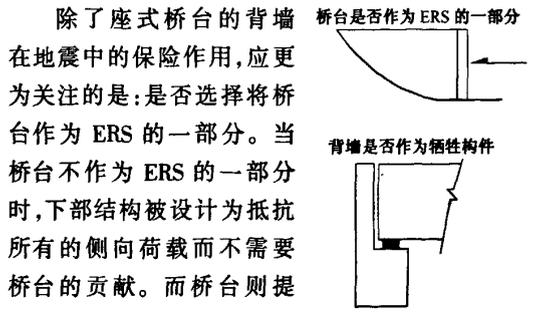


图 5 桥台抗震单元  
Fig.5 Abutment Element

除了座式桥台的背墙在地震中的保险作用,应更为关注的是:是否选择将桥台作为 ERS 的一部分。当桥台不作为 ERS 的一部分时,下部结构被设计为抵抗所有的侧向荷载而不需要桥台的贡献。而桥台则提供了一种无法量化的额外的安全机制。为了保证墩柱可以抵抗侧向荷载,应假设桥台的刚度和能力都为零。而当桥台作为 ERS 的一部分时,就需要更高水平的分析。这个设计方案需要一个连续的上部结构,将荷载纵向传递至桥

台,而桥台则作为一个附加的能量耗散单元。在设计和分析中应该包含桥台的刚度和能力,并且由桥台位移引起的被动土压力区域会延伸到一般被用于静力使用荷载设计的主动压力区域。在这里,规范给出了假设的被动土压力数值。当使用 100% 的假设被动土压时,则应经业主同意后方可使用,当设计基于不大于 70% 给定的被动土压时,则被归类为容许使用的抗震单元。

总之,是否将桥台作为 ERS 的一部分,要看设计意图是要减少中间墩柱的造价还是要将桥台作为一个良好的安全储备。一个好的设计是需要有一定的结构冗余度的,如果可能的话,可以使墩柱被设计为抵抗所有的地震力,以保证在在桥台抗力无效的情况下,桥梁仍能抵抗地震力和位移。在这种情况下,桥台就提供了一个更强的安全储备。

### 5 保证桥梁整体性的连接措施

目前,保证桥梁整体性的连接措施主要有三类,即设置足够的支承宽度、设置纵向位移限制器和横向剪力键(挡块)。对这三方面,中美规范都有一些具体的规定。

#### 5.1 最小支承宽度

最小支承长度是在超过预期强度的地震作用下,假定不用限位装置时,防止上部结构从下部结构顶部脱落而需要确保的梁端到下部结构支承边缘的距离。为了防止梁与下部结构的相对变位过大而产生落梁,需要加大墩台的支承长度。在斜桥、曲线桥、高墩桥梁中,常采用增大支承长度的方法来防止上、下部结构间较大的相对位移造成落梁。为了便于比较,本文统一了两种规范中公式的单位和符号。

表 3 最小支承宽度(a)比较  
Table 3 Minimum Support Length Requirements(a) Comparison

	AASHTO 抗震指南	中国抗震规范
最小支承宽度 (mm)	$a = (200 + 0.0017L + 0.0067H)(1 + 0.000125S^2)$ 对 SDC A, 当 $A_s > 0.05$ 时, 为 $0.75a$ ; $A_s < 0.05$ 时, 为 $1a$ ; 对 SDC B 和 C, 为 $1.5a$ 或者最大计算位移中的最大值; 对 SDC D, 为 $a = (4 + 1.65\Delta_{eq})(1 + 0.00025S^2) \geq 24$	对简支梁: $a \geq 700 + 0.005L$ 对斜桥: $a > 0.5L_0 \sin\theta - \sin(\theta - \alpha_E)$
注释	$H$ : 相邻伸缩缝间下部结构的平均高度 (mm); $S$ : 从垂直于跨度的线量出的支承的斜度 (mm); $\Delta_{eq}$ : 伸缩缝一侧的长周期框架的地震位移需求 (mm); $L$ : 梁的计算跨径 (mm); $L_0$ : 上部结构跨径 (m); $\theta$ : 斜交角	

虽然两国规范都考虑了最小支承长度,但从表 3 中仍可以看出若干不同点。(1)从数值上看,我国规范的最小支承长度的设置,实际上还是远大于美国规范的经验值的。以一个 100m 跨径,下部结构平均高度为 30m 的桥梁为例,在我国规范中,最小支承长度为 1.2m,而在“AASHTO 抗震指南”中,如果不考虑倾斜效应的话,  $a$  的计算值仅为 0.5m,对于 SDC C 和 D 的桥梁,为  $1.5a$ ,也仅为 0.75m,还是远小于我国规范。在我国现行规范中,最小支承长度的计算公式为  $50 + L$ ,也同样大于“AASHTO 抗震指南”。(2)“AASHTO 抗震指南”中,对于不同抗震设计类别的桥梁,是提供了不同的支承长度水平的。除了 SDC A 只需要根据经验公式进行估值外,其余设计类别的桥梁还需要计算其地震位移需求,并与经验公式进行比较方能确定最小支承长度。而我国规范主要是根据经验公式来进行支承长度的设置。

5.12 汶川地震中的桥梁震害就说明,仅靠经验公式不能满足这种远超预期的大地震中桥梁位移的要求。

#### 5.2 纵向位移限制器

当可利用的支承长度不能满足最小要求时,就需要考虑安装纵向位移限制器。根据连接方式分类,纵向位移限制器可以分为梁梁连接以及梁与墩台连接。其中,梁梁连接在“AASHTO 抗震指南”中又分为连续梁相邻两联跨内伸缩缝间的纵向联系及简支上部结构相邻梁间的纵向联系。而在中国的桥梁设计中,很少在伸缩缝间使用限位器,只是通过在梁间或梁与墩台间使用钢缆、钢棒、锚杆等来防止上部结构的跌落。纵向位移限制器主要具有防止简支跨落梁、减轻框架间不同相运动以减小位移以及防止跨间碰撞的作用。而在“中国抗震规范”中,提出在梁梁间和梁与桥台胸墙间增加橡胶垫或其他弹性

衬垫来实现防撞功能。另外值得注意的是,“AASHTO 抗震指南”提出震动传递单元(Shock Transmission Units, 以下简称为 STUs)可替代纵向位移限制器来使用。STUs 是由液体阻尼器演化而来的被动控制技术,但 STUs 并不耗散能量。STUs 的特征就是在正常情况下,装置可以随着结构的移动(如热、蠕变和收缩引起的)而移动,只产生和结构移动相协调的非常小的力。但是当施加一个大的荷载时,大的荷载产生的速度将使 STUs 能提供一个瞬间暂时的锁定。而当大的荷载不存在时,装置又可以自由移动。所以 STUs 又被称为锁定装置(lock-up device)。这样锁定装置就能有效的防止碰撞,且能通过让邻近墩分担荷载而减轻固定墩荷载。STUs 的使用,可避开使用研究尚不完善的纵向限位器,且

具有很好的效果,是新的减震发展方向。

5.3 横向剪力键(挡块)

除了纵向限位装置,在桥梁横向也需要使用限位装置,常用的便是剪力键限位装置。“AASHTO 抗震指南”剪力键分为内部剪力键与外部剪力键。其中外部剪力键就相当于我国的挡块装置。由于内部剪力键不容易检查和修复,并且由于剪力键的刚度变化、剪力键与上部结构间缝隙尺寸的变化以及桥梁的倾斜角度的变化等条件都会导致内部剪力键承受不等的荷载。对于有不等刚度的中间墩的结构,剪力键的荷载不等状况就会变的更加复杂。因此一般很难精确确定剪力键的设计荷载。所以在“AASHTO 抗震指南”中建议对于新桥建设最好使用外部剪力键。

表 4 纵向位移限制器比较

Table 4 Longitudinal Restrainers Comparison

规范	设计荷载	设计要求
AASHTO 抗震指南	单跨桥:不小于有效峰值加速度系数 $A_v$ 与附属恒载之积 其他形式:需根据业主指定的标准进行设计。	若限位器位于墩上,应尽量固定在墩上而不是连接相邻两跨;若限位器位于在地震动中上部结构截面被设计为会发生相对位移的地方,在限位器中应留出足够间隙,以使限位器在设计位移被超过前不起作用;限位器应该易于检查和更换,布局应关于上部结构中心线对称;应具有足够的缝隙以满足服务条件;
中国抗震规范	无	在 7 度区以上必须使用限位器;应具有足够的变形能力和强度,不影响正常使用时的功能且不妨碍支座变形;无损于支座移动或回转等功能;能顺应横桥向移动;便于支座维护管理;能将作用于防落梁装置上的地震力切实传递到上下部结构;

表 5 “AASHTO 抗震指南”剪力键设计

Table 5 Shear Keys Design in AASHTO

弹性构件	墩柱上剪力键	使用与柱的超强弯矩相关的、且考虑倾覆效应的轴力和剪力作为柱剪力键设计荷载,剪力键中的配筋应尽可能的布置在距离墩柱中心线近的地方,以最小化键中钢筋力矩的发展。
	伸缩缝处剪力键	对于 SDC D 的桥梁,若需要剪力键在设计风险水平下达到可靠的性能,应建立非线性分析来获得受不同相运动影响的剪力键上的分布力。
	桥台处剪力键	SDC B 和 C:一般设计为弹性状态,抵抗不少于有效峰值加速度系数 $A_v$ 与附加恒载之积的水平地震力。若有必要设计为牺牲构件,参考 SDC D 的设计考虑。 SDC D:将剪力键设计为弹性状态或者牺牲构件。对于不打算被成为保险的剪力键,弹性设计荷载可基于结构的弹性需求分析得到,且在设计中考虑每个剪力键中的不等荷载。
牺牲构件	$V_{sk} = 2V_n, V_n = cA_{cs} + \mu[A_{sv}f_y + P_c]$ 且 $V_n \leq 0.2f'_c A_{cs}$ 或 $V_n \leq 5.5A_{cs}$ $V_n$ :使用期望材料性质和界面条件得到的剪力键名义界面剪切能力; $A_{cs}$ :介入剪力传递的混凝土面积( $\text{mm}^2$ ); $A_{sv}$ :穿过剪力平面的剪力筋面积; $f_y$ :钢筋的屈服强度; $c$ :粘结系数; $\mu$ :摩擦系数; $P_c$ :垂直于剪力平面的永久净压力,若为拉力,则为 0; $f'_c$ :强度较低一侧的混凝土 28d 的规定抗压强度。	

剪力键不仅可以对桥梁横向位移进行限制,同时还 将桥梁上部结构的惯性力传入到下部结构和基础中,是荷载路径上非常重要的一个组成部分。当希望控制下部结构损伤时,还可将剪力键作为牺牲构件来进行设计。对于剪力键的设计,“AASHTO 抗震指南”中有着较为明确的规定,而“中国抗震规范”中仍然是一个空白。实际上我国的剪力键的设计仍然处在一个凭经验的盲区。从 5.12 汶川地震桥梁震害看,剪力键的破坏是比较严重的,桥梁的横向位移也较大。但从另一个侧面来看,剪力键的破坏阻断了横向荷载的向下传递。那么如何在控制力的传递与控制梁体位移之间取得一个平衡,应该是抗震研究工作的一个重点。

“AASHTO 抗震指南”中对剪力键的最低要求是在高频地震事件中保持弹性状态,而在设计地震水平下剪力键则常被设计为牺牲构件。但对于纤细的排架的盖梁顶部剪力键在设计地震水平下应保持为弹性。而对于桥台处的剪力键,当桥台不作为 ERS 的一部分时,桥台处的剪力键作为牺牲构件使用,且应在桥梁设计中考虑内力重分布效应。当 ERS 包含有桥台贡献时,桥台上的剪力键应该被设计为承担设计地震力和滑动摩擦力中的较小值。桩支承基础应该被设计为承担设计地震位移,且桥台处桩的塑性位移被认为是可接受的。另外值得注意的是,当剪力键作为牺牲构件使用时,“AASHTO 抗震指南”明确提出了剪力键的综合超强能力  $V_{sk}$ ,且  $V_{sk}$  应小于桩的塑性剪切能力,以控制在桥台和支承桩中的损伤。具体设计要求和弹性构件的设计荷载的确定见表 5。

6 结语

本文通过对“AASHTO 抗震指南”与“中国抗震规范”的比较,从中找出“AASHTO 抗震指南”中最大的亮点——桥梁抗震体系。通过对抗震体系特征及实现方式的介绍,对美国桥梁抗震规范的新进展有了较为深入的了解。抗震体系突出了对于结构体系的选择、结构的总体布置以及各种耗能装置的组合使用,从总体上对抗震有了全局的把握和统筹,是在进行抗震设计初始阶段对于整座桥梁性能的统一规划,从源头上保证了抗震设计的可靠性。“AASHTO 抗震指南”中基于性能的理念,给予业主充分的选择权,丰富的抗震单元库,尤其对于基础和桥台成为结构抗震的组成成分都为我国现行桥梁抗震规范的修

订提供了有效的参考和补充。尤其在 5.12 汶川大地震后,通过对美国抗震规范中较为先进的研究成果的吸收,可以拓展我国工程师的思维空间,提高设计水准。

参考文献(References):

[ 1 ] AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design[S]. Subcommittee for Seismic Effects on Bridges T-3, 2007

[ 2 ] AASHTO. 2007. LRFD Bridge Design Specifications, 4th Ed [S]. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.

[ 3 ] Seismic design criteria, Version 1. 4, Sacraments, California, California department of Transportation (CALTRANS), Division of Structures, 2006

[ 4 ] NCHRP 12-49 (2001). Recommended LRFD Guidelines for the Seismic Design of Highway Bridges[R]. NCHRP 12-49 Project Team, MCEER, State University of New York at Buffalo, Buffalo, NY

[ 5 ] JTJ004-89, 公路工程抗震设计规范[S]. JTJ004-89, Seismic Design Specifications of Highway Engineering[S](in Chinese)

[ 6 ] 公路桥梁抗震设计规范(征求意见稿) JTG/T B02-01-2008, Guidelines for Seismic Design of Highway Bridges[S](in Chinese)

[ 7 ] 范立础,胡世德,叶爱君. 大跨度桥梁抗震设计[M]. 北京:人民交通出版社, 2001  
Fan Li-chu, Hu Shi-de, Ye Ai-jun. Seismic design of long span bridges [M]. Beijing: China Communications Press, 2001(in Chinese)

[ 8 ] 范立础,王君杰. 桥梁抗震设计规范的现状与发展趋势[J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(3): 70 ~ 77  
Fan Li-chu, Wang Jun-jie. Design code for earthquake-resistance of bridges: current situation and trend [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, 21(2): 70 ~ 77(in Chinese)

[ 9 ] Prestley, M. J. N., Seible, F. and Calvi, G. M. Seismic Design and Retrofit of Bridges. New York: John Wiley & Sons, 1996

[ 10 ] 范立础,李建中,王君杰. 高架桥梁抗震设计[M]. 北京:人民交通出版社, 2001  
Fan Li-chu, Li Jian-zhong, Wang Jun-jie. Seismic design of viaduct [M]. Beijing: China Communications Press, 2001 (in Chinese)

[ 11 ] 朱文正,刘建新. 公路桥梁防落梁系统研究现状述评[J]. 广州大学学报, 2005, 4(4): 347 ~ 356

(下转第 15 页)

## 5 结语

本文采用大型有限元分析程序 ANSYS 对某典型的三跨连续钢结构曲线箱梁桥的地震反应进行了分析,得出结论如下:

(1) 公路曲线箱梁桥一般曲线箱梁的刚度较大,桥墩的刚度较小,故前三阶振型以桥墩的振动为主,桥墩弯扭变形较大。

(2) 在对曲线梁桥进行地震反应分析时,采用反应谱法求出的地震反应值均小于用时程分析法求出的结果。所以,应根据工程具体情况采用多条地震波进行计算,以保证设计的安全。

(3) 采用 ANSYS 有限元分析程序,能很好地分析结构的内力、位移及时程反应。其计算方法和计算结果可供设计人员参考。

### 参考文献(References):

- [1] 周绪红,戴鹏,狄瑾.曲线PC箱梁桥隔震体系的非线性分析[J].中国公路学报,2008,21(1):65~71
- [2] 徐勋,卫星,刘德军,强士中.扁平曲线箱梁静动力特

性分析[J].公路交通科技,2007,(24)12:60~65

- [3] 周勇军,赵小星,贺桂海,等.弯钢箱梁桥的动力分析及模态试验[J].郑州大学学报,2005,26(4):20~24
- [4] 王根会,甘亚南.连续箱梁动力特性的理论分析研究[J].兰州交通大学学报,2004,23(4):1~4
- [5] 朱东生,刘世忠,虞庐松.曲线桥地震反应研究[J].中国公路学报,2002,15(3):42~48
- [6] 柳春光,焦双健.城市立交桥结构三维地震反应[J].地震工程与工程振动,2001,21(2):41~47
- [7] 柳春光,王前信.已建立交桥结构地震反应上限研究[J].地震工程与工程振动,2001,21(3):55~59
- [8] Chang P C, Heins C P, Li G H, et al. Seismic study of curved bridges using the Rayleigh-Ritz method [J]. Computers and Structures, 1985, 21(6): 1095~1104
- [9] Scordelis A C, Wasti S T, Seible F. Structural response of skew RC Box girder bridge [J]. Journal of the Structural Division, ASCE 1982, 108(1): 89~104
- [10] Chaudhuri S K, Shore S. Dynamics analysis of horizontally curved I-girder bridges [J]. Journal of the Structural Division, ASCE 1977, 103: 1589~1604

[作者简介] 肖卓(1963~),男,上海市人,副教授,工学硕士,主要从事工程结构动力分析研究,E-mail:zhaog8@163.com

[通信地址] 安徽建筑工业学院土木工程学院工程力学系(230022)

(上接第8页)

Zhu Wen-zheng, Liu Jian-xin. Present Development on the Collapse-proof Systems Research for Bridge [J]. Journal of Guangzhou University (Natural Science edition), 2005, 4 (4): 347~356 (in Chinese)

- [12] 王军文,李建中,范立础.桥梁结构地震碰撞效应及防落梁措施研究现状[J].公路交通科技,2001,5(24):

71~75

Wang Jun-wen, Li Jian-zhong, Fan Li-chu. State of Art of Current Studies on the Effect of Seismic Induced Pounding between Adjacent Bridge Decks and Falling-off Prevention Measures [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2001, 5(24), 71~75 (in Chinese)

[作者简介] 殷鹏程(1983~),男,安徽人,硕士研究生,研究方向为桥梁抗震,E-mail:pcyin0609@163.com

[通讯地址] 叶爱君(1970~),女,浙江人,博士、教授,主要从事大跨度桥梁抗震理论研究,E-mail:yeaijun@mail.tongji.edu.cn

(上接第20页)

Chen Bao-chun. The design and construction of steel pipe concrete arched bridge [M]. Beijing: China Communications Press, 1999 (in Chinese)

- [5] 陈宜言,汤国栋,廖光明,谢北成.拱式桥梁破损安全吊杆及其系统研究[J].四川大学学报[工程科学

版], 2008, 39(1): 20~26

Chen Yi-yan, Tang Gou-dong, Liao Guang-ming, Xie Bei-chen. Study on Failure Safety Suspender Systems of Arch Bridges [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2008, 39(1): 20~26 (in Chinese)

[作者简介] 滕军,男,教授,博导。研究方向:结构抗震抗风;高层复杂建筑结构;大跨空间钢结构;桥梁结构;结构振动控制;结构健康监测;城市与工程综合防灾减灾