

高速铁路桥梁减震技术研究

李承根¹, 高 日²

(1. 铁道第一勘察设计院集团有限公司, 西安 710043; 2. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

[摘要] 结合高速铁路桥梁抗震设计的需要, 提出支座功能分离的设计理念, 利用减震棒的塑性变形能力实现桥梁减震目的, 建立了以材料应力、应变性能与抗震设防目标匹配的设计准则, 并分析了高速铁路简支箱梁桥采用减震棒后的减震效果。

[关键词] 高速铁路桥梁; 减震设计; 支座功能分离; 材料性能准则; 减震棒

[中图分类号] U442.5+5 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2009)01-0081-06

1 汶川地震的思考

汶川大地震是我国近 30 年来最为严重的自然灾害, 其影响范围大, 震区的房屋建筑、公用设施、道路、桥梁均遭受损伤或破坏, 直接损失与间接损失难以估量。据实测地震动参数和烈度评估统计表明, 汶川地震的影响烈度大都在 7 度以上(江油市震区实测烈度为 7~9 度, 彭州市震区实测烈度为 8~11 度), 动峰值加速度也都高于规范数值。

在抗震救灾过程中, 进入灾区的道路若能早一天抢通, 都可能多挽救成百上千条生命, 从中人们深刻地体会到了交通运输通道对抢险救灾的重要性。因此, 认真反思以往在基础设施建设中的得失, 进一步提高基础设施抵御自然灾害的能力已成为国人的共识。

在这次汶川地震中, 铁路设施经受了地震的考验, 相对损失较小, 并在抗震抢险过程中发挥了积极的作用和巨大贡献。说明铁路以往的设计理念及采用的规范标准是基本合理的, 与我国国民经济发展水平是相一致的。但也暴露出一些问题, 需要引起重视和解决, 根据成都、西安、兰州铁路局汶川地震灾后的调查资料来看, 铁路桥梁出现的病害与破坏主要集中在两个方面。

1) 支座破坏: 主要破坏形式有支座螺栓被剪

断、拔出(见图 1、图 2), 支座限位装置破坏失去功能, 钢滚轴支座上、下盘错位等(见图 3、图 4)。



图 1 桥梁支座固定螺栓被拔出

Fig. 1 Bolts are sheared



图 2 支座螺栓被剪坏

Fig. 2 Bolt is pulled out

2) 桥墩台损坏: 主要形式有墩身出现贯通的环状裂缝、墩身混凝土局部崩裂、桥墩侧倾移位、桥台

[收稿日期] 2006-11-12; **修回日期** 2006-11-24

[作者简介] 李承根(1950-), 男, 甘肃会宁县人, 铁道第一勘察设计院集团有限公司副总工程师, 长期从事桥梁勘察设计科研工作, E-mail: lichenggen0@163.com; 高 日(1959-), 男, 内蒙古兴和县人, 北京交通大学土木建筑工程学院教授、硕士生导师, 研究方向为桥梁结构工程, E-mail: rigao@bjtu.edu.cn



图3 盆式支座限位器被破坏
Fig. 3 Failure of restrainer



图4 固定支座被剪坏
Fig. 4 Fixed bearings are sheared

移位等。

铁路桥梁以往均采用素混凝土的重力式桥墩结构,当地震发生时,上部结构的地震力全部由支座传给桥墩,在巨大的地震力作用下,或者使桥墩受损开裂,或者使连接梁体与桥墩的薄弱环节支座发生破坏。但从另一角度看问题,支座破坏后梁体产生位移,释放了地震力,避免桥墩遭到更大的破坏,可能反而是件好事。由于铁路桥梁设计中一贯重视防落梁设施的设置,汶川地震铁路桥梁几乎未发生桥梁坠落的事件。但是,由于铁路运输的特点,桥梁支座破坏后的修复与更换仍然十分困难,所以应当广泛收集震害资料,深入总结和分析汶川地震铁路桥梁震害的经验与教训,推进铁路桥梁设计理论、设计方法的发展。

2 高速铁路桥梁的抗震设计

我国正处于高速铁路建设大发展的时期,在建和待建的高速铁路总里程将达到上万公里。为了充分贯彻节约土地的基本国策,加快铁路建设速度以适应国民经济发展的需要,在高速铁路建设中大量采用了以桥代路,桥梁比例已达到线路总长度的70%~80%,而其中绝大部分都是简支箱梁桥。因此,高速铁路桥梁抗震设计应重点研究解决简支箱

梁桥所存在的问题。

新颁布的铁路抗震规范^[1,2],提出了三水准两阶段设计的原则,在多遇地震下,桥梁结构按弹性理论设计,不允许结构产生大的损伤和破坏。罕遇地震下,桥梁结构按弹塑性理论设计,引入延性设计方法,允许结构产生可修复的损伤和破坏,但结构物不得倒塌。从而使“小震不坏、中震可修、大震不倒”的设计原则在规范标准体系中得以体现。与旧规范相比,新规范较大幅度地提高了桥梁的抗震设防水准。测算结果表明,普速铁路桥梁在多遇地震下设计水平地震力一般要提高40%~120%。对于高速铁路桥梁又进一步提高了设计时重要性系数的取值。

为了满足高速列车运行的安全性和舒适度指标,高速铁路桥梁设计时,从上部梁体到下部桥墩、基础都十分重视提高结构的刚度。但从结构抗震的角度来看,刚度大,基频高,结构相应产生地震力就更大,尤其在以桥代路的低矮桥墩中更为突出,往往成为高地震烈度区控制桥梁设计和工程投资的主要因素。

郑西客运专线华山至西安段,8度地震区(地震动峰值加速度0.25g),线路走行于渭河二级阶地,大部分采用了“以桥代路”,桥梁高度普遍在10m左右。据统计,多遇地震下32m简支箱梁桥的地震水平力就高达2000kN,该段桥梁桩基础设计均由地震力检算控制,平均桩长因此而增加5~7m。粗略估计,该段桥梁设计因此而增加的工程投资就超过了 2.0×10^8 元。而在罕遇地震条件下,由于重力式桥墩墩身刚度很大,难以出现塑性铰,以致在高速铁路桥梁工程中无法采用延性设计方法。一旦发生超出设计地震烈度的强烈地震,结构几乎会不可避免地将产生严重的损伤和破坏。

因此,传统的高速铁路桥梁抗震设计方法存在许多严重弊端,应当引入减震设计方法,探寻和研究适合高速铁路桥梁减震设计的措施,增强高速铁路桥梁抵御地震灾害的能力。

3 支座功能分离的减震设计理念

减隔震设计方法及技术措施大致可以分为两类,减隔震技术和延性抗震设计。减隔震技术主要通过采用减隔震装置来尽可能地将上部结构与可能引起破坏的地面运动分离开来,从而大大减小了传递到上部结构的地震力和能量。延性抗震设计则是

通过结构的延性来提高结构的抗震能力。这两种方法均已在日本、美国、新西兰等国的桥梁抗震设计规范中得到体现^[3]。我国铁路抗震规范给出的延性设计方法,是利用墩身出现塑性铰后,桥墩产生较大的延性变形达到减小地震响应的目的,这种方法的弊端在于,一旦静定结构的简支梁桥墩出现塑性铰,就形成了一个接近于机动体系的不稳定结构,尽管桥墩塑性铰仍具有一定的承弯能力。因此,必须采用有限延性的概念严格控制桥墩的塑性变形,况且这种方法并不适用于高速铁路桥梁设计。

桥梁减隔震技术,在梁体与墩台的连接处安装减隔震支座,如板式橡胶支座、盆式橡胶支座、铅芯橡胶支座等,通过改变结构周期和阻尼来减小结构的地震反应。中铁第一勘察设计院曾研究过利用铅芯橡胶支座的减隔震原理,在南疆铁路高烈度地震区的布谷孜大桥进行了铁路实桥的减隔震设计与工程实践,试验结果与实践均表明,在高烈度地震区采用减隔震设计取代传统的抗震设计是一种理想的选择。但由于橡胶支座横向刚度较弱,难以满足铁路桥梁动力性能方面的要求。

双曲面球型减隔震支座是对普通球型支座的改进,由于这种支座采用双曲面,地震时,固定支座剪断其水平约束后,在发生水平位移的同时,会产生一定的竖向位移,并具有一定的复位功能。但是这种支座价格昂贵,不适用于在简支梁桥中大面积推广,再者,固定支座水平约束的剪断便意味着支座发生了损伤破坏,震后的修复仍然存在很多实际问题。

国内外大量研究和工程实践表明,理想的减隔震支座或装置应具备3个基本功能。

1) 正常使用功能:即正常使用条件下的竖向和水平刚度可以保障桥梁正常工作。

2) 周期延长功能:即在地震作用下可通过延长结构基本周期,避开地震能量集中的频率范围,从而减小结构的地震响应。

3) 能量耗散功能:即通过能量耗散来减小地震作用下结构的响应。

如何实现上述基本功能呢?特别是对于铁路桥梁来说,既要求有足够的刚度保证列车高速平稳运行,又要求有足够的变形能力来有效降低地震力的作用水平,应该说是铁路桥梁减隔震技术的最关键问题之一。

经过反复研究,笔者提出了支座功能分离的减隔震设计思路,该设计理念是将桥梁固定支座改为活

动支座,在正常使用状态下,梁体传来的竖向反力及梁端的转角仍由支座实现,但梁体的水平反力及水平位移则由减震榫支撑和控制。地震发生后,梁体地震水平力将通过减震榫传至桥墩。通过对减震榫构造的精细化设计,在正常运营下满足列车对桥梁刚度的使用要求,在强震下有足够的延性以达到减小地震力的目的。

支座功能分离的减隔震设计方法相对于传统的抗震设计方法有了本质的变化^[4]。传统的结构抗震设计方法都是使结构具有足够的强度和刚度,以达到抗震设防目标。这种“以强制强”的设计方法,不但增大了结构的地震反应,而且还将付出沉重的经济代价。支座功能分离的减隔震设计方法通过对支座体系水平和竖向功能的分离,具有传力路径明确、各部件功能单一、横向和竖向变形不耦联、易于精细化设计和控制的特点,从而实现减隔震目的。

4 减震榫的结构形式研究

将减震榫下端锚固于桥墩顶帽上,上端伸入梁体底面一个预埋的钢盒中,用橡胶或沥青砂胶堵塞减震榫与钢盒之间的缝隙,使其与梁体实现理想的铰接传力,同时,将固定支座改为活动支座,于是实现了支座功能的分离。

由图5可以看到,就受力行为而言,减震榫是典型的悬臂梁结构,属于弯剪构件。当上端作用水平力为 p 时,减震榫弯矩分布为三角形,根部最大弯矩由下式决定:

$$M = p \cdot h \quad (1)$$

式(1)中, M 为减震榫根部弯矩, $\text{kN} \cdot \text{m}$; p 为减震榫端部作用水平力, kN ; h 为减震榫高度, m 。

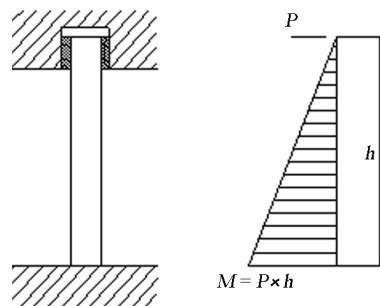


图5 减震榫

Fig. 5 Absorber

4.1 对减震榫刚度的要求

由于梁体与桥墩通过减震榫连为一体,桥墩的

线刚度将发生变化,如下式:

$$K = \frac{K_d K_s}{K_d + K_s} \quad (2)$$

式(2)中, K 为合成后的桥墩线刚度; K_d 为原桥墩线刚度; K_s 为减震榫线刚度。

为了满足桥上铺设无缝线路的需要,桥墩纵向线刚度不能因为与减震榫组合而有较大的削弱,对于 32 m 简支箱梁,桥墩线刚度要求不小于 400 kN/cm,因此减震榫的刚度应当大于 2 000 kN/cm,方可保证桥墩与减震榫的组合线刚度能满足要求。通过上面的分析,得到的结论是:一方面在使用状态下的弹性阶段,希望减震榫具有较大的刚度;另一方面,又希望在地震发生时减震榫提供较大的塑性变形。这一矛盾,需要在减震榫设计中妥善解决。

4.2 对减震榫延性性能的要求

结合桥梁抗震设计的要求,减震榫应当在多遇地震、设计地震、罕遇地震 3 种不同条件下,呈现不同的变形性能,实现抗震与减震的作用。减震榫设计时应当合理选择其材料的最大应变范围,图 6 显示的是钢材的典型应力应变曲线关系,其中, σ_b 为钢材的极限强度, σ_s 为钢材的屈服强度。

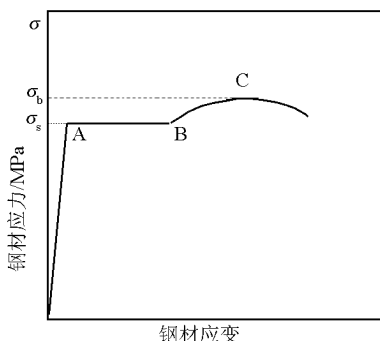


图 6 钢材应力应变曲线

Fig. 6 Strain - stress curve of steel

按照“小震不坏、中震可修、大震不倒”的原则,我们提出减震榫基于材料性能的设计准则如下。

1) 在正常使用状态下,减震榫工作应力按规范规定取值。最大应变控制在 A 点以下(0.15% 左右),且应具备足够的抗推刚度,以满足铁路桥梁行车的安全性、舒适性指标要求,及无缝线路对桥墩墩台线刚度的要求。

2) 多遇地震水平下,抗震规范要求桥梁结构按弹性理论进行设计与检算,不得出现较大的损伤,由于减震榫可不考虑疲劳问题,故允许出现少量塑性

变形。最大应变控制在 A 点附近($\leq 0.5\%$)。

3) 设计地震水平下,抗震规范要求检算上下部结构的连接构件强度,结构允许出现损伤,但经短期抢修后,可恢复其使用功能。据此可以规定,减震榫允许出现较大的塑性变形,工作范围在材料的屈服平台上,最大应变控制在 B 点(2% ~ 3%)。

4) 罕遇地震水平下,结构允许出现损伤与破坏,但不得倒塌。据此,减震榫的最大应变可进入材料的应变强化段。但不得超过极限拉应变,以保证减震榫不致失效,造成落梁事故的发生。最大应变控制在 B 点 - C 点之间(5% ~ 8%)。

5 高速铁路简支箱梁桥减震榫设计

传统的铁路简支梁桥抗震设计,上部结构产生的水平地震力是通过支座和支座锚螺栓传给桥墩,考虑到强烈地震发生时,支座锚螺栓可能被剪断,为防止地震落梁的事件发生,在墩顶埋设防落梁设施(剪力榫)。当支座锚螺栓被剪断后,梁体移动触及剪力榫后,剪力榫才起到限位和防落梁的作用。显然,通常做法的剪力榫并未起到减震耗能的作用。

传统设计的剪力榫仅起到地震中防落梁的作用。如果将剪力榫的结构形式和构造加以改变,由承受剪力改变为承受弯矩,就能合理地利用其塑性变形性能,实现减震耗能的目的,这就是笔者提出的减震榫。然而,利用减震榫实现减震目的,不仅是减震榫本身结构和功能的改进,更主要的是设计思想、设计方法的转变。

5.1 减震榫构造设计

下面结合高速铁路 32 m 简支箱梁(见图 7)介绍利用减震榫的延性行为实现桥梁减隔震的具体做法。

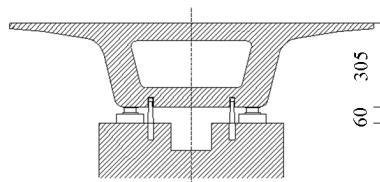


图 7 简支箱梁与减震榫(单位:cm)

Fig. 7 Simply supported girder and absorber(unit:cm)

32 m 简支箱梁主要设计参数:跨径 $L_p = 32.0$ m,梁高 $H = 3.05$ m,上部结构质量(含桥面系) $N = 1\,449$ t,梁底至墩顶距离 $h = 0.6$ m。

根据支座功能分离的设计理念,将原固定支座改为活动支座,原有的活动支座不变,在箱梁两端与桥墩之间各设置两根减震樨,箱梁变为纵横向均为弹性约束的状态。梁体传来的竖向反力及梁端的转角由活动支座实现,梁体的水平反力及水平位移则由减震樨来实现。

通过精细化设计与制造,使减震樨在正常使用下处于弹性工作状态,在强震作用下,进入塑性工作状态,达到减震耗能目的。图 8 为减震樨结构示意图,其中区段 A 为减震樨变形段,区段 B 为减震樨锚固段。

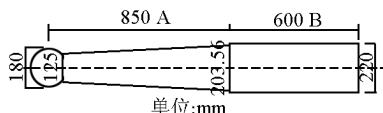


图 8 减震樨结构
Fig. 8 Absorber structure

5.2 减震樨的受力变形行为

按照图 8 设计的减震樨尺寸,进行了构件延性分析,减震樨的 $p-\Delta$ 曲线如图 9 所示,减震樨的滞回曲线如图 10 所示。计算得到,减震樨端部弹性水平位移为 $\Delta = 0.00586 \text{ m}$,对应的杆端水平力为 $p = 325 \text{ kN}$;减震樨端部最大塑形水平位移为 $\Delta' = 0.0709 \text{ m}$,对应的杆端最大水平力为 $p_{\max} = 383 \text{ kN}$ 。一孔梁(双线)共设置 4 根减震樨,每侧梁端各设置两根。单根减震樨刚度为

$$K_j = \frac{p}{\Delta} = \frac{325}{0.586} = 554.6 (\text{kN/cm})$$

4 根剪力樨的合成刚度则为 $K_s = 2218.0 (\text{kN/cm})$

运营条件下,一孔梁按 ZK 活载计算的列车制动力为 253 kN,减震樨产生的纵向弹性水平位移仅为 $\Delta = 1.1 \text{ mm}$ 。在横向摇摆力和风力作用下产生的横向位移也很小,均能满足规范要求。

5.3 桥梁减震效果分析

5.3.1 多遇地震条件下

设置减震樨后,由于减震樨刚度与桥墩刚度组合的效果,低矮桥墩的刚度得到折减,同时使地震水平力得到较大幅度的降低。

仍然以郑西客运专线 32 m 简支梁桥为例,以桥代路段高度 6 ~ 16 m 的桥墩刚度为 1650 ~ 640 kN/cm,设置减震樨后桥墩组合刚度为 950 ~ 500 kN/cm,如图 11 所示。

由于桥墩刚度降低,结构自振周期延长,使墩顶水平力与墩身弯矩均得到减少,墩顶水平力分别减

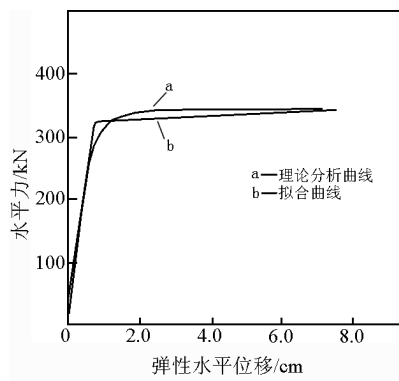


图 9 减震樨的 $p-\Delta$ 曲线

Fig. 9 Load-displacement relationship of absorber

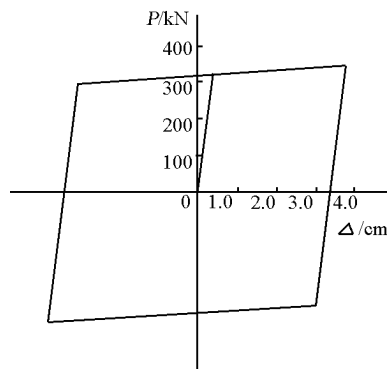


图 10 减震樨的滞回曲线

Fig. 10 Hysteretic curve of absorber

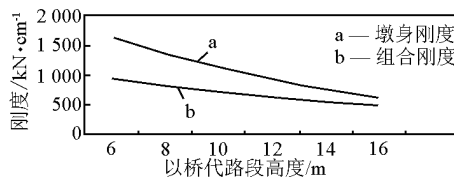


图 11 墩身刚度变化示意图

Fig. 11 Stiffness variation of the pier

少了 18.4% ~ 41.1%,墩身弯矩分别减少了 25.2% ~ 45.3%,其中以低矮桥墩的降低幅度尤为显著,见表 1 与表 2。

表 1 墩顶地震水平力对照

Table 1 Comparison of earthquake responses(force) on pier capping

墩高/m	6	8	10	12	14	16
水平力/kN	2307	2341	2059	1810	1609	1445
	1451	1378	1334	1285	1232	1179
降幅/%	37.1	41.1	35.2	29.1	23.4	18.4

表2 墩身地震弯矩对照

Table 2 Comparison of earthquake responses(moment) in pier shaft

墩高/m	6	8	10	12	14	16
弯矩/kN·m	16 359	22 173	24 572	26 192	27 458	28 491
	9 618	12 125	14 708	17 115	19 321	21 313
降幅/%	41.2	45.3	40.1	34.7	29.4	25.2

5.3.2 设计地震条件下

8度地震区(动峰值加速度取0.25g)的32m简支箱梁下产生的地震水平力为

$$p = 1\,449 \times 0.25 \times 10 = 3\,623 \text{ (kN)}$$

设置减震樨后,当地震发生时,剪力樨产生塑性变形,墩顶由上部结构传来的地震水平力,由于剪力樨的减震作用,较大幅度得到削减:

$$p = 383 \times 4 = 1\,532 \text{ (kN)}$$

5.3.3 罕遇地震条件下

按照笔者提出的减震樨性能准则4,减震樨材料将进入应变强化区段工作,可提供更大的塑性变形,以满足桥梁结构减震设计的需要。由于篇幅关系,不再赘述。

6 结语

四川汶川地震后铁路桥梁震害的调查表明,铁路桥梁的主要破坏形式为支座破坏和桥墩开裂或偏位。

作为连接梁体与桥墩的重要部件,支座成为地震时极易破坏的薄弱环节。高速铁路桥梁仍广泛采用了重力式桥墩,为了满足列车高速行驶的舒适度和安全性要求,结构刚度远大于一般的普速铁路,传统的抗震设计方法存在许多弊端。于是,高地震烈度区的高速铁路桥梁抗震设计成为亟待解决的新问题。

笔者所介绍的支座功能分离的减震设计理念可能成为铁路桥梁减震技术的一条有效途经。减震樨工作原理是:在正常使用状态下,梁体传来的竖向反力及梁端的转角位移仍由支座实现,但梁体的水平力及水平位移则由减震樨承受。地震发生后,梁体地震水平力将通过减震樨传至桥墩,如果减震樨能够提供较大的水平塑性变形,就可以起到良好的减震效果。

参考文献

- [1] GB 50011-2001. 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2001
- [2] GB 50111-2006. 铁路工程抗震设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2006
- [3] 孙利民,范立础. 阪神地震后日本桥梁抗震设计规范的改订[J]. 同济大学学报(自然科学版),2001,(01):64-68
- [4] 薛晓锋,胡兆同,刘健新. 功能分离式桥梁减震支座[J]. 长安大学学报(自然科学版),2005,25(1):36-39

Study on the shock absorbing technique of high speed railway bridges

Li Chenggen¹, Gao Ri²

(1. China Railway First Survey and Design Institute Group Ltd, Xi'an 710043, China;

2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

[Abstract] Based on the idea of bearing function separation, a structural member called shock absorber that makes use of its plastic deformation, is presented for reducing the seismic response of the bridge. The design criterion, for matching material stress, strain and earthquake fortification aim, is also given. The analysis results show that the high speed railway box girder with the absorber in this paper has great reduction of seismic response of the bridge piers.

[Key words] high speed railway bridge; aseismatic design; bearing function separation; material property criterion; shock absorber