

一种应用于铁路连续梁的新型铅芯阻尼器的研究

李承根 陈应陶

(铁道第一勘察设计院 甘肃兰州 730000)

摘要:如何将减隔震技术应用于铁路连续梁的工程设计,是值得关注的研究课题。通过需求分析,结合铁路连续梁的特点,提出了新型铅芯阻尼器的设计一构思,并采用概念设计方法对阻尼器应用于铁路连续梁减隔震设计的可行性进行了分析。分析结果表明:铅芯阻尼器应用于铁路连续梁的减隔震设计可取得很好的效果,使作用于连续梁F部结构的地震水平力得到较大幅度的减小,从而减小墩身与基础的工程量,取得较好的技术经济效益。

关键词:减隔震技术 新型铅芯阻尼器 构造 原理 效果分析

1 前言

地震作为一种严重的自然灾害,由于其突发性很强,目前尚无有效的短期预测手段。地震常常会造成灾区建筑倒塌、交通瘫痪、人员伤亡惨重,引起火灾、水灾和瘟疫传播,还可能造成海啸、滑坡、崩塌、地裂缝等次生灾害。我国地处世界两大地震带——环太平洋地震带与欧亚地震带之间,根据20世纪全球资料统计,我国占全球陆地面积7%,却发生了占全球地震35%的7级以上大陆地震;我国是一个地震多发的国家,平均每年发生20次5级以上地震。

抗震救灾过程中,灾区的交通道路若能及时恢复,都可能多挽救成百上千条生命,从中人们深刻的体会到了交通运输通道对抢险救灾的重要性。因此,认真反思我们以往在基础设施建设中的得失,进一步提高基础设施的地震设防标准已成为国人的共识。铁路作为国民经济的大动脉,在国家的整体防灾减灾系统中具有十分重要和不可替代的作用。因此,努力提高铁路抵御自然灾害(特别是特大地震)的能力,是我们铁路建设者面临的一项重要课题。

2 铁路桥梁采用减隔震技术的必要性

铁路桥梁为满足列车行车的舒适性和安全性要求、列车荷载集度远大于汽车荷载以及桥上无缝线路对轨道系统稳定性的需求等多种因素影响,使得铁路桥梁在设计时无论是上部结构的梁体,还是下部结构的墩身和基础都采用了较大的变形刚度和质量。这样做虽然使铁路桥梁的安全性、耐久性指标得到了有效保证,但从抗震设计

的角度来看却是十分不利的。

按照现行《铁路工程抗震设计规范》的要求,铁路桥梁应按照“三水准、两阶段”的原则进行抗震设计。所谓“三水准”是指多遇地震、设计地震和罕遇地震,其地震重现期按照超越概率推算分别为50年、475年和2475年。而“两阶段”设计则是要求进行多遇地震和罕遇地震两个阶段的分析和检算,按照“小震不坏、中震可修、大震不倒”的原则,在多遇地震条件下,桥梁主体结构应基本完好,桥梁稍加整修后即可迅速恢复通车;而在罕遇地震发生时,桥梁结构则不应发生整体垮塌,为震后的修复创造必要的条件。

按照上述要求,目前的铁路桥梁结构在进行多遇地震检算时,通过基础桩身加长和加强墩身与桩身配筋,在付出一定的经济代价的条件下尚可符合规范要求。但罕遇地震时仅靠加强结构设计就不能解决问题,因此规范条文中引入了“延性设计”的规定和方法,并在规范附录内给出了利用铅芯橡胶支座进行减隔震设计的方法。

所谓“延性设计”是指在大震发生时,墩身将在指定部位出现“塑性铰”,利用墩身的延性行为减小地震响应,该方法虽然可以达到避免结构不垮塌的目的,但墩身将出现严重的损伤和变形,震后修复难度极大,费用很高,对于重要桥梁采用该设计方法时须十分慎重。

铅芯橡胶支座是一种已经比较成熟的减隔震装置,有较多的工程应用先例,但为了满足铁路桥梁正常使用条件下的刚度要求和对其耐久性方面的质疑,尚有许多问题需要研究和论证,可以说

铅芯橡胶支座在铁路桥梁中的应用前景并不乐观。

为了解决铁路桥梁减隔震设计问题,之前我们曾在国家“863”课题支持下,开发了适用于铁路简支梁减隔震设计的减震棒产品(软钢屈服器类型),试验和研究分析表明该产品具有构造简洁、受力明确、阻尼耗能指标优越(阻尼比可高达0.42以上)、耐久性好等优点,在罕遇地震条件下采用减震棒后铁路简支梁桥的地震响应可减小70%~85%,减隔震效果十分理想。但若将该产品应用于铁路连续梁的减隔震设计,却存在一些自身固有的缺陷难以克服,如:如何有效释放梁体温度变形、塑性位移难以达到20cm以上、单个构件受力较小(30吨左右)等问题。

3 铁路连续梁减隔震设计的需求分析

由于连续梁结构具有跨越能力大、刚度大、结构受力合理、整体性好、可选择的施工方法多等众所周知的优点,在铁路建设中当跨越河流、道路、管线等障碍物时被大量采用。

常用的铁路箱形连续梁跨径组合及质量如表1所示。

表1 常用铁路箱形连续梁跨径组合及质量

跨径组合 (米)	每延米圬工量 (m ³ /延米)	每延米二期恒载 (吨/延米)	每延米换算质量 (吨/延米)
32+n×48+32	12.3	16.0	48.0
40+n×56+40	13.6	16.0	51.4
40+n×64+40	14.6	16.0	54.0
48+n×80+48	16.4	16.0	58.6

连续梁就其结构体系而言,一般为多跨一联,纵向只设一个固定支座,用以承担运营阶段的纵向制动力和牵引力,保证连续梁结构纵向的几何位置,由于温度变化和混凝土收缩徐变引起的梁体伸缩变形,则由其余桥墩上的纵向活动支座予以释放,连续梁横向在各支点处均设置横向固定支座。图1为一座典型的40+2×64+40米连续梁的纵向布置示意图。

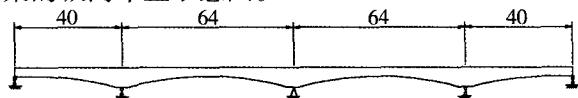


图1 某连续梁纵向示意图

当地震发生时,上部结构梁体由于地震作用产生的地震水平力将通过支座传向下部的墩身与基础。下面我们用概念设计方法对64米连续梁地震响应做简单的分析。

已知:上部结构连续梁全联的总质量约为

11000吨,假定该桥位于八度地震区(地震动峰值加速度0.2g),多遇地震下相应的地震动峰值加速度为0.07g(考虑重要性系数后为0.105g),不考虑动力放大系数影响时,上部结构全联质量产生的地震水平力为

$$P=11000 \times 0.105 \approx 1150 \text{ 吨}$$

罕遇地震下相应的地震动峰值加速度为0.38g,不考虑动力放大系数影响时,上部全联结构质量产生的地震水平力为

$$P=11000 \times 0.38 \approx 4180 \text{ 吨。}$$

多遇地震时,连续梁横向均为固定支座,横向地震力主要由三个主墩承受,墩顶横向地震水平力约为380吨左右,设计难度不大。但连续梁纵向由于只有一个固定支座,扣除活动支座摩阻力后(摩阻系数取0.02),固定墩承受的墩顶地震水平力将高达1000吨,墩身与基础的设计难度较大。为了解决该问题,可以采取在连续梁的三个中间墩上纵向设置阻尼器,使三个墩共同受力,并通过延长结构周期和阻尼耗能的共同作用降低整个结构的地震响应,假定减震率为50%,则每个中间墩的墩顶地震水平力可控制在200吨以内。

罕遇地震时,仍采用活动墩纵向设置阻尼器的方案,虽然可以使中间墩墩顶地震水平力由于共同受力和减隔震作用效果得以减小(假定减震效果可达到65%);但连续梁横向地震水平力作用于桥墩墩顶的量值却很大,使桥墩和基础的设计十分困难。

$$P_{\text{纵向}}=4180 \times 0.65/3 \approx 490 \text{ 吨}$$

$$P_{\text{横向}}=4180/3 \approx 1400 \text{ 吨}$$

连续梁结构抗震设计时,需要兼顾多遇地震和罕遇地震两个阶段的分析检算,仅依靠一个固定墩来承担纵向地震水平力是很不合理的,应考虑采用减隔震设计方案,使多个活动墩共同参与受力;同时,需要注意的是在连续梁抗震设计时,应在连续梁的纵向和横向均考虑采用减隔震设计措施。

另一方面,铁路桥梁在采用减隔震设计时必须满足运营阶段的使用要求。根据铁道科学研究院高芒博士针对减震棒装置的车桥动力仿真分析结论;减隔震装置在使用阶段必须具有足够的初始刚度(研究表明,就32米梁而言,减隔震装置的刚度应大于2600kN/cm),方能保证行车的安全性、舒适性指标满足要求。此外,减隔震装置还应能够有效释放梁体由于温度变化和混凝土

收缩徐变产生的变形,不致在结构中产生过大的附加应力。

通过上面的分析,我们可以确定适用于铁路连续梁的减隔震装置需要满足以下几项基本条件。

(1) 减隔震装置应具备足够的初始刚度,当跨度为48米至80米范围内时,刚度取值应大致在4000~6000 kN/cm以上。

(2) 设置于活动墩的减隔震装置应能释放梁体的温度变形和收缩徐变变形,该值大约相当于30℃温差作用于梁体的效应,表2为不同跨度和跨数连续梁在活动墩处需要释放的位移值。

表2 不同跨度和跨数连续梁在活动墩处需要释放的位移值

	32+n×48+32	32+n×56+32	32+n×64+32	32+n×80+32
n=2	1.44cm	1.68cm	1.92cm	2.40cm
n=3	2.16cm	2.52cm	2.88cm	3.60cm
n=4	2.88cm	3.36cm	3.84cm	4.80cm
n=5	3.60cm	4.20cm	4.80cm	6.00cm

(3) 减隔震装置应能够提供足够的塑性变形和较高的阻尼比,通过延长周期和滞回耗能作用有效地降低结构的地震响应,同时该装置应具有较好的低周疲劳性能,在多遇地震的位移水平下,应能通过50~100次的低周疲劳试验,在罕遇地震的位移水平下,应能通过10~15次的低周疲劳试验。

(4) 减隔震装置应具有良好的耐久性,养护和维修工作量小。

4 新型铅芯阻尼器的构造及原理

在铁路连续梁减隔震设计需求分析的基础上,对铅芯橡胶支座、高阻尼橡胶支座、摩擦摆式支座、粘滞阻尼器及软钢阻尼器等目前常用的减隔震装置的优缺点和适用条件进行比较和筛选,我们提出了一种新型铅芯阻尼器的设计方案。阻尼器构造如图2所示。

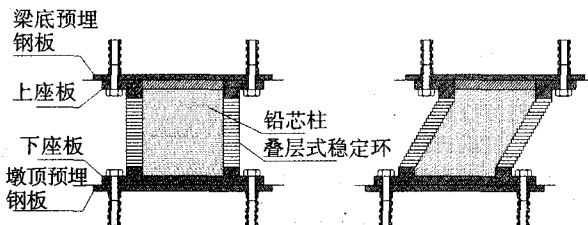


图2 阻尼器构造

阻尼器中间的圆柱体为具有变形耗能功能的铅芯,其外围为多层不锈钢板或镀铬钢板组成的叠层式稳定环,其作用是在铅芯发生大位移的剪

切循环变形时约束中间铅芯的基本几何形状,稳定环的各层之间设置有聚四氟乙烯滑块,以保证层间可轻松地相对滑动,并设置有保持层间竖向联系及层间水平限位的构造。

铅芯阻尼器的主要性能参数将由铅芯柱的直径 D 及高度 h 确定,其初始刚度(铅芯屈服前)及屈服荷载分别为

$$K_{\text{初始}} = \frac{Q}{\Delta} = \frac{Q \cdot G}{\tau \cdot h} = \frac{G \cdot A}{h}$$

$$Q_{\text{屈服}} = [\tau] \cdot A$$

式中; Q —为作用于铅芯上的水平荷载; G —为铅的剪切模量, $G=7\text{GPa}$

A —为铅芯柱的面积, $A=\pi R^2$; H —为铅芯柱的高度

τ —为铅芯剪应力; $[\tau]$ —为铅的剪切屈服强度, $[\tau]=8.5\text{MPa}$

该设计方案采用新型铅芯阻尼器和“支座功能分离”的减隔震设计思路,具体做法是将连续梁中间墩的支座均改为活动支座,在正常使用状态下,梁体传来的竖向反力仍由支座实现,但梁体的水平反力及水平位移则由铅芯阻尼器支撑和控制。

于是,连续梁成为介于传统连续梁与连续刚构之间的一种结构形式,我们知道,就结构的受力特点而言,连续梁与连续刚构相比并无本质的区别,在连续梁中支点处设置铅芯阻尼器后,连续梁的中支点成为有别于连续梁铰接和连续刚构固结的一种新的连接形式,除了竖向约束外,它允许发生转角变形和有条件的水平变形。通过对铅芯阻尼器性能参数的精细化设计,可以在正常运营条件下释放梁体的水平变形,并能够满足列车对桥梁刚度的使用要求,在强震发生时产生足够的延性变形,达到降低地震响应的目的。

支座功能分离的减震设计方法通过对支座体系水平和竖向功能的分离,将发生延性变形的部位和构件予以明确,具有以下优点:传力路径明确、各部件功能单一、横向和竖向变形不藕联。铅芯阻尼器的耗能部件为铅芯,由于铅作为金属材料力学性能较稳定,在大位移剪切屈服变形时重结晶的特性,可以避免一般金属材料的疲劳损伤和破坏,而铅芯外围的叠层式稳定环由于采用机加工方式保证构件精度,易于实现对铅芯阻尼器的精细化设计和控制,以取得更好的减、隔震效果。此外,由于铅芯阻尼器属于多向变形受力

构件,可以同时满足连续梁纵向与横向减隔震设计的需求。

新型铅芯阻尼器具有构造简洁、受力明确的优点,铅芯具有剪切屈服变形大、不会产生疲劳破坏的特点,外围的不锈钢叠层式稳定环结构保证了整体构件具有良好的耐久性,上下底座的螺栓连接方式使震后的维修和更换十分方便。

5 新型铅芯阻尼器减隔震效果分析

概念设计一般指不经过详细的计算分析,而是根据对宏观结构体系的认识和把握,利用最基本的力学概念和分析方法,对研究的对象能够迅速、有效地做出正确的判断和估算。我们知道地震是一种小概率事件的自然灾害,实际上是无法用精确的数学模型来描述结构在未来地震时可能发生的动力响应,因此,在方案研究阶段,结构的抗震和减隔震设计采用概念设计方法将更便捷、更合适。

推荐在概念设计中采用非线性反应谱分析方法。由于研究对象为连续梁上部结构的地震反应,可暂时忽略下部墩身质量影响,仅考虑梁部质量在一阶自振周期的贡献,用单质点模型进行分析。此时,墩顶地震水平力 P 为

$$P = \alpha \cdot \beta \cdot \eta \cdot M$$

式中: α —地震动峰值加速度; β —动力放大系数;

η —阻尼调整系数; M —上部结构质量

由该公式,我们可以将结构的减隔震效果视为由两部分所组成,分别是结构周期延长引起的动力系数减小 β 和阻尼器滞回耗能的地震响应降低系数 η 。按照铁路抗震规范给出的反应谱曲线,结构的动力放大系数为

$$\beta = 2.25 \frac{T_S}{T} \text{ 且 } \beta \leq 0.45$$

式中: T —结构一阶自振周期; T_S —场地特征周期

结构的一阶自振周期计算公式为

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}}$$

式中: M —上部结构质量; K —墩身与阻尼器的合成刚度

墩身与阻尼器的合成刚度为

$$K = \frac{K_p \cdot K_{eff}}{K_p + K_{eff}}$$

式中: K_p —墩身抗推刚度; K_{eff} —阻尼器有效刚度
铅芯阻尼器的滞回特性可采用双线性模型,如图3所示。

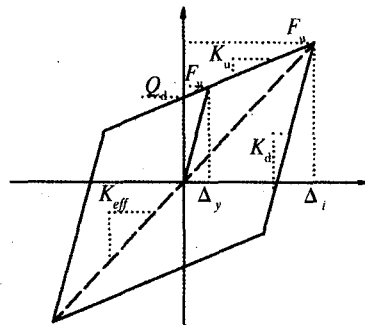


图3 支座特性等量线性化示意图

阻尼器的初始刚度 K_u 为

$$K_u = \frac{F_y}{\Delta_y}$$

阻尼器屈服后的刚度 K_d 为

$$K_d = \frac{F_m - F_y}{\Delta_i - \Delta_y}$$

阻尼器的有效刚度为

$$K_{eff} = \frac{1 + a_d (\mu_d - 1)}{\mu_d} K_u$$

阻尼器的等量阻尼比为

$$\xi_h = \frac{2(1 - a_d) \left(1 - \frac{1}{\mu_d}\right)}{\pi [1 + a_d (\mu_d - 1)]}$$

式中: μ_d —阻尼器的水平位移延性系数, $\mu_d = \Delta_i / \Delta_y$;

a_d —阻尼器的应变硬化比, $a_d = K_d / K_u$;

Δ_i —阻尼器的设计水平位移; Δ_y —阻尼器的屈服位移;

墩身的合成阻尼比 ξ 及阻尼调整系数 η 分别为

$$\xi = \frac{\xi_h + \xi_d \frac{K_{eff}}{K}}{1 + \frac{K_{eff}}{K}}$$

$$\eta = 1 + \frac{0.05 - \xi}{0.06 + 1.7\xi} \quad \eta < 0.55 \text{ 时, 取 } \eta = 0.55$$

式中 K —桥墩的合成抗推刚度; ξ_d —桥墩的黏滞阻尼比,取 $\xi_d = 0.05$;

由上面公式可以看出,墩身合成阻尼比 ξ 实际上要小于阻尼器等量阻尼比 ξ_h ,减小幅度大约在30%~50%左右,而阻尼器等效刚度与墩身合成刚度之比 λ 对其影响不大,见图4。

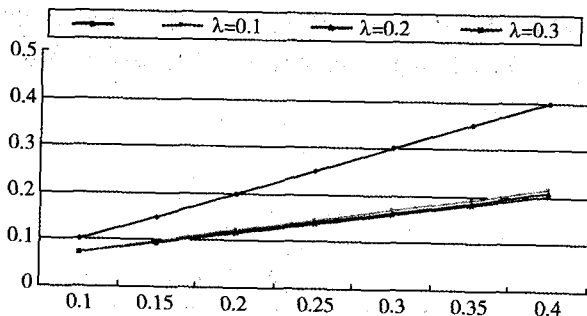


图4 阻尼器等效刚度与墩身合成刚度之比对墩身合成阻尼比的影响

阻尼调整系数 η 随墩身合成阻尼比 ξ 而变化, 阻尼比 ξ 越大, 减隔震效果越显著, 对应的阻尼调整系数 η 值越小, 其变化规律如表3所示。

表3 阻尼调整系数 η 随墩身合成阻尼比 ξ 变化规律

ξ	0.05	0.10	0.15	0.2	0.25	0.30
η	1.000	0.783	0.683	0.625	0.588	0.561

下面我们将采用非线性反应谱方法, 对一座位于八度地震区(0.3g)的128米铁路连续梁采用新型铅芯阻尼器的可行性作简要分析判断。

已知: 铁路连续梁孔跨布置为80+2×128+80米, 桥全长417.6米, 全桥上部结构总质量为27000吨。多遇地震时, 地震动峰值加速度为0.10g(取重要性系数1.5); 场地特征周期0.45秒; 罕遇地震时, 地震动峰值加速度为0.57g, 场地特征周期0.55秒。由于地震烈度较高, 若不采用减隔震措施, 罕遇地震下墩顶地震水平力将达到4000~5000吨。

首先, 我们对罕遇地震下结构的减隔震效果进行估算。按最理想的减隔震作用, 延长结构自振周期至2.75秒以上, 使动力放大系数为最小值 $\beta=0.45$; 墩身的合成阻尼比取0.2, 对应的阻尼调整系数为 $\eta=0.625$, 于是连续梁上部质量产生的总水平力为:

$$P = \alpha \cdot \beta \cdot \eta \cdot M = 0.57 \times 0.45 \times 0.625 \times 27000 = 4330 \text{ 吨}$$

平均作用于一个中间墩上的墩顶水平力约为1440吨。每墩的支点反力约8500吨, 扣除支座摩阻力后(摩阻系数取0.02), 铅芯阻尼器承受的水平力约为1270吨。

铅芯阻尼器的铅芯柱直径取620mm, 高度600mm, 则阻尼器的屈服荷载为:

$$Q_{\text{屈服}} = [\tau] \cdot A = 250 \text{ 吨}$$

假定大位移剪切变形后, 水平荷载可提高1.2~1.3倍, 则一个阻尼器最大可提供300~330吨左右的水平承载能力, 每个桥墩上可按布置四

个铅芯阻尼器考虑。

梁体最大水平位移计算, 将 $T=2.75$ 秒, 代入结构一阶自振周期的计算公式, 可求得三个桥墩的合成刚度为

$$K = 4\pi^2 M / T^2 = 570 \text{ kN/cm}$$

则, 梁体最大水平位移为

$$\Delta = P/K = 25.3 \text{ cm}$$

多遇地震时, 可按阻尼器刚好进入屈服状态考虑, 三个桥墩12个阻尼器的水平屈服荷载为3000吨, 此时, 若不考虑阻尼调整作用, 结构的动力放大系数应为

$$\beta = P/\alpha M = 3000/0.15 \times 27000 = 0.74$$

结构的一阶自振周期及桥墩的合成刚度应为

$$T = 2.25 T_s / \beta = 1.368 \text{ 秒}$$

$$K = 4\pi^2 M / T^2 = 5700 \text{ kN/cm}$$

则, 梁体最大水平位移为

$$\Delta = P/K = 5.3 \text{ cm}$$

当考虑阻尼调整作用后, 多遇地震下梁体最大水平位移将减小10%~20%。实际上, 由于纵、横向桥墩刚度不同, 连续梁横向地震水平力要略大于纵向地震水平力。

通过上述分析我们可以看出, 铅芯阻尼器应用于铁路连续梁的减隔震设计可取得很好的效果, 使作用于连续梁下部结构的地震水平力得到较大幅度的减小, 从而减小墩身与基础的工程量, 取得较好的技术经济效益。

同时, 由于铅芯阻尼器屈服前具有很大的水平刚度; 能够满足铁路桥梁列车运行的安全性、舒适性要求; 连续梁梁体的温度变形可通过铅芯阻尼器小位移的屈服变形得以释放, 不存在铅芯疲劳损伤问题, 且该屈服变形也不会影响地震时阻尼器的变形耗能性能。

6 结语

如何将减隔震技术应用于铁路连续梁的工程设计, 是值得关注的一项研究课题。通过需求分析, 结合铁路连续梁的特点, 我们提出了新型铅芯阻尼器的设计构思, 并采用概念设计方法对阻尼器应用于铁路连续梁减隔震设计的可行性进行了分析。

目前, 铁一院与欧维姆公司联合开展对该产品的研究开发, 针对装置构造细节进行设计优化, 下一步将安排进行实物模型试验, 以获取详细的性能参数。我们期望能够尽快将新型铅芯阻尼器应用于工程实践, 为我国铁路桥梁的减隔震技术的进步和发展做出贡献。