

文章编号: 1002-0268 (2006) 03-0065-05

限位装置静力设计研究

朱文正¹, 刘建新²

(1. 广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510405; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 在地震中, 由于桥梁联结间伸缩缝处过大的变位会造成桥梁的破坏, 所以需要在支座宽度不足的伸缩缝间设置适当的限位装置, 以限制伸缩缝间的相对位移。文章对限位装置的设计思想进行了探讨, 通过对桥梁按不同的重要性等级进行分类, 引入桥梁地震荷载重要性系数, 提出了限位装置的设计地震力和位移的计算方法, 并对限位装置的构造以及设计过程进行了介绍。通过对算例结果的反应谱分析, 证明了该设计方法能够有效地减小桥梁控制位置的剪力和相对位移, 从而达到限位的目的。

关键词: 桥梁工程; 抗震加固; 限位装置; 设计理论; 设计方法

中图分类号: U442.5+5

文献标识码: A

Research on Static Design for Restrainers

ZHU Wen-zheng¹, LIU Jian-xin²

(1. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangdong Guangzhou 510405, China;
2. Highway College, Chang'an University, Shaanxi Xi'an 710064, China)

Abstract: Since relative large displacement between the bridge's frames can cause damage of bridge, suitable restrainers should be used in the place without adequate seated length to restrict the relative displacement. In the paper, the design idea of restrainer is discussed. Through the classification of the importance for bridges, the importance coefficient of seismic load for bridge is introduced, the design method of the devices is put forward, and the construction and design process of the devices are introduced. According to the result of response spectrum analysis, the shear force and the relative displacement of the controlled parts for bridge are efficiently reduced, so the aim to restraining the relative displacement between the girder and the pier of bridges is achieved. Through the theoretical analysis and numerical calculation, the design method is proved to be reasonable and suitable, and these can be reference to the seismic enforcement for bridges.

Key words: Bridge engineering; Seismic retrofit; Restrainer; Design theory; Design methods

近年来, 锚固钢棒式限位器在国内的桥梁设计和施工中得到一些应用。文献 [1] 根据铁路桥梁抗震设计规范^[2], 按照基本烈度的 1.5 倍计算支座的地震力, 对南京长江大桥的抗震性能进行评估, 并根据评估结果对桥梁进行了抗震加固; 文献 [3] 根据公路桥梁抗震设计规范^[4], 用桥梁的重要性系数按基本烈度计算支座的地震力, 在桥梁上安装了抗震销。这些

应用只是对固定支座的抗震加固, 没有考虑碰撞的作用。限位装置在日本得到了广泛的应用, 但是其设计思想不很明确。在对地震力的设计中, 1996 年以前的规范^[5] 取为 2 倍的震度法对应的水平震度, 根据限位装置在后来的地震中出现的震害, 1996 年的规范修订^[6] 中取以前设计地震力的 1.5 倍。

根据限位器的设计思想, 限位器是和支座一起来

收稿日期: 2004-12-02

基金项目: 交通部公路工程标准专题研究项目 (200202)

作者简介: 朱文正 (1971-), 男, 河南上蔡人, 博士, 讲师, 主要研究方向为桥梁抗震与振动控制。(zhu7101@163.com)

抵抗地震时结构的惯性力，是支座抗震能力的补充，在支座破坏时，防止结构上下部之间的相对位移过大，因而本文结合国内的抗震设计思想，提出了新的静力设计方法。

1 常用限位器的功能和构造

(1) 锚固钢棒式功能

①利用缓冲橡胶的压缩变形来吸收地震能量和降低地震的冲击力，防止梁从墩顶脱落。

②缓冲橡胶的压缩变形有变位硬化的特征，刚度随变位的增大而缓慢增加。在较强地震发生时，限位装置需要缓慢地阻止上下部结构之间的相对移动，因而安装缓冲橡胶材料有限位的功能。

③通过改变橡胶的厚度，可以任意设定缓冲材料的弹性刚度。

(2) 锚固钢棒式构造^[7]

锚固钢棒式限位器是在下部结构顶部竖直埋设钢棒，在上部结构一侧埋入的钢箍里安装缓冲橡胶，利用钢棒和缓冲橡胶的恢复力实现限位功能的装置。其

构造如图 1 所示。

①缓冲材料埋设在上部结构一侧，固定于钢箍内侧。

②在钢棒和缓冲材料之间的空隙中加入发泡塑料(海绵等)以确保施工时的间隙。

③上部结构和下部结构之间有 20mm 的间隙，中间插入橡胶垫块，以防止灰尘等的侵入。

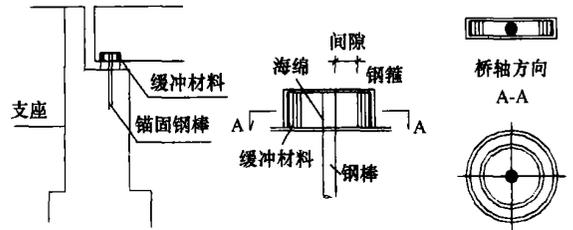
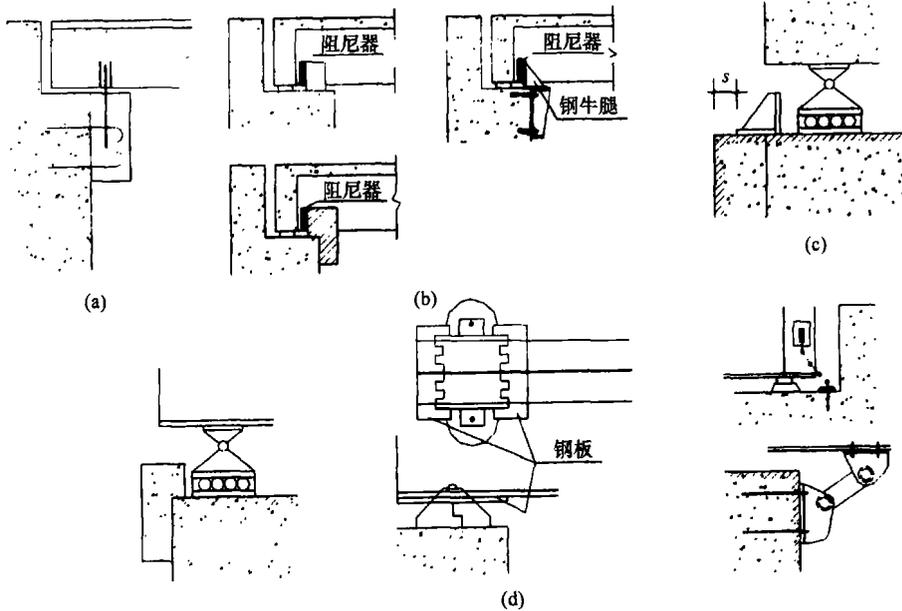


图 1 锚固钢棒式限位器的构造图

Fig 1 Structure of anchor restrainers

(3) 桥梁加固常用的限位装置构造^[9]

限位装置在国内外的桥梁设计和加固中已经得到比较广泛的使用，除锚固限位器外，常用的构造如图 2 所示。



注：(a) 混凝土板梁桥安装锚固螺栓使板与拓宽基底连接；(b) RC 或 PC 梁式桥是橡胶支座而未用锚固螺栓的及其它形式支座在横梁前安装限位装置；(c) RC 或 PC 梁式桥、钢桥用滚轴支座的在支座前安装 RC 或钢限位装置；(d) 钢梁用其它形式支座。

图 2 现有桥梁在活动支座上限位器的安装

Fig 2 Restrainer used with bearings

2 限位装置的静力设计

限位装置的静力设计思想是限位装置在基本地震烈度时开始起作用，和支座一起抵抗作用在结构上的地震力；在小震作用下，限位装置不允许破坏。考虑

到重要性不同的桥梁对应的地震设计基准期不同，引入桥梁地震荷载重要性系数。对应不同场地的水平地震系数，取最大脉冲的 2 倍作为设计地震力，脉冲的最大值为众值烈度的水平地震系数。

(1) 设计条件

设计地震力计算

$$H_s = 2\alpha K_h R_d \quad (1)$$

式中, H_s 为限位装置的设计地震力; α 为限位器设计地震力的重要性系数, 如表 1 所示; K_h 为基本烈度对应的水平地震系数; R_d 为支座的恒载反力。

表 1 桥梁地震荷载重要性系数

Tab 1 Significance coefficient of seismic load for bridge

| | | | | |
|---------|-----|-----|-----|-----|
| 设计基准期/a | 100 | 75 | 50 | 25 |
| 重要性系数 | 1.3 | 1.2 | 1.0 | 0.8 |

假定一条支承线上设置的限位装置平均分担设计地震力。

限位装置的移动间隙为 L_1 地震等级时支座的允许变形量。其设计移动间隙要满足支座的变形能力, 考虑到支座安装的误差可取设计余量为 $15\text{mm}^{[10]}$ 。

$$L_s \geq L_{sd} \quad (2)$$

$$L_{sd} \geq L_E + L_A \quad (3)$$

式中, L_s 为限位装置的间隙; L_{sd} 为限位装置的设计间隙; L_E 为 L_1 等级时支座的变形量, 普通橡胶支座为其容许剪切变形量; L_A 为限位装置的间隙余量。

根据设计流程图 3, 锚固钢棒式限位器的设计应先确定钢棒的根数、直径和缓冲材料的尺寸, 从而得到缓冲材料的目标刚度和强度。

(2) 锚固限位器缓冲材料设计

缓冲橡胶材料的试验表明^[8]: ①即使在锚固钢棒与缓冲橡胶局部压缩的情况,

只要适当地选取锚固钢棒和缓冲橡胶的接触面积, 结果和全面压缩的一样。缓冲装置的弹性刚度可以由橡胶的弹性系数、接触面积和橡胶的厚度求出。②缓冲装置的橡胶为叠层橡胶, 装置的弹性刚度在最初压缩阶段是非线性增加的, 在装置弹性刚度呈线性之前, 缓冲橡胶有一定的压缩变形量。变形量与锚固钢棒的直径没有关系, 只要保证橡胶的层数和层厚即可。

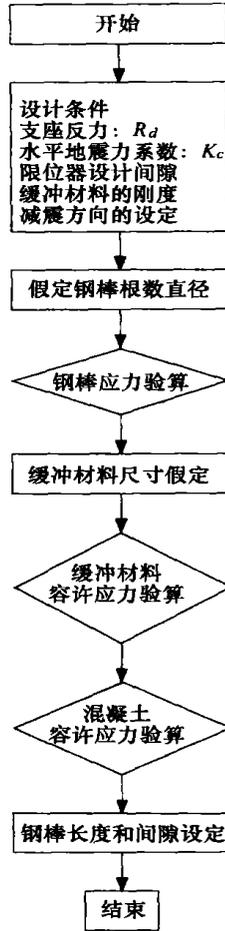


图 3 锚固限位器设计流程图

Fig 3 Design flow for anchor restrainers

a 弹性刚度计算

$$K_c = T_f \times G_o \times A_c / \alpha_c \quad (4)$$

$$A_c = b_c \times L \quad (5)$$

$$\alpha_c = (\phi - \sqrt{\phi^2 - b_c^2}) / 2 \quad (6)$$

$$b_c = b_{c0} + b_{cm} \times n \quad (7)$$

式中, K_c 为弹性刚度; T_f 为试验测得的系数, 一般取为 212.0; G_o 为橡胶的剪切系数; A_c 为橡胶与钢棒之间的压缩接触面积; α_c 为橡胶的沉入量; b_c 为橡胶与钢棒间压缩接触面的宽度; b_{c0} 为两层橡胶对应的 b_c 的标准值 (如表 2 所示); b_{cm} 为橡胶层数对应的修正值 (如表 3 所示); L 为缓冲材料的长度; ϕ 为钢棒的直径; n 为橡胶的层数。

表 2 橡胶压缩宽度 b_c 的修正值 b_{c0}

Tab 2 Standard value b_{c0} for compress width b_c mm

| 一层橡胶的厚度 | 钢棒直径 ϕ | | |
|----------|-------------|-----|-----|
| | 100 | 150 | 200 |
| $t = 12$ | 55 | 65 | 75 |
| $t = 16$ | 65 | 75 | 90 |
| $t = 20$ | 75 | 90 | 110 |

表 3 橡胶压缩宽度 b_c 的修正值 b_{cm}

Tab 3 Standard value b_{cm} for compress width b_c mm

| 一层橡胶的厚度 | 钢棒直径 ϕ | | |
|----------|-------------|-----|-----|
| | 100 | 150 | 200 |
| $t = 12$ | 5 | 5 | 5 |
| $t = 16$ | 5 | 10 | 10 |
| $t = 20$ | 5 | 10 | 10 |

b 缓冲材料的长度

$$L \geq \frac{H}{(b_c + 2t) \times \alpha_a} \quad (8)$$

式中, L 为缓冲材料的长度; H 为上部结构的惯性力; t 为缓冲材料的厚度; α_a 为混凝土的容许压应力; b_c 为橡胶与钢棒间压缩接触面的宽度。

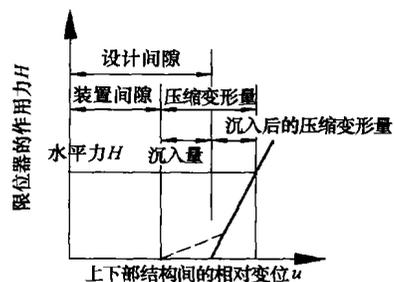


图 4 锚固钢棒式限位器的间隙与变形示意图

Fig 4 Sketch map of clearance and distortion for anchor restrainers

c 缓冲材料的压缩应力

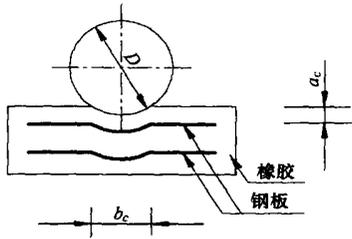


图5 钢棒与缓冲橡胶接触面积示意图

Fig 5 Touch area between steel stick and cushion rubber

$$\sigma_R = \frac{H}{A_c} \leq \sigma_{mc} \quad (9)$$

式中, σ_R 为缓冲材料的压缩应力; H 为上部结构的水平地震力; A_c 为橡胶与钢棒之间的压缩接触面积; σ_{mc} 为缓冲材料的容许压应力。

(3) 锚固钢棒设计

①钢棒的弯曲力矩

$$M = H \times h_1 \quad (10)$$

$$\sigma_s = \frac{M}{Z_s} \leq \sigma_{sa} \quad (11)$$

式中, M 为钢棒的弯曲力矩; H 为上部结构的水平地震力; h_1 为(上下部结构间的间隙) + ($L/2$);

σ_s 为钢棒的弯曲应力; Z_s 为钢棒的截面系数; σ_{sa} 为钢棒的容许应力。

②钢棒剪应力计算

$$\tau = \frac{H}{A_s} \leq \tau_{sa} \quad (12)$$

式中, τ 为钢棒的剪应力; H 为上部结构的水平地震力; A_s 为钢棒的截面面积; τ_{sa} 为钢棒的容许剪应力。

③锚固钢棒长度计算

- a 在上部结构中的埋深: 要比缓冲材料长 50mm。
- b 在下部结构中的埋深: 要达到钢棒直径的 10 倍。

3 数值分析算例

某跨越高速公路的 4 跨连续梁桥, 跨径组合为 17m+ 20m+ 20m+ 17m(如图 6 和图 7 所示)。上部结构为钢筋混凝土连续箱梁, 宽 5m, 高 1.1m。箱梁和上部铺装的混凝土用量约为 4.7m³/延长米。采用单柱式桥墩, 墩柱采用直径为 1.3m 的圆形截面, 高 6.5m, 为 C30 混凝土, 柱顶各设置一个 $\phi 600$ 普通橡胶支座, 桥墩基础为 4.5m × 4.5m 扩大基础。箱梁两端搁置在桥台上, 并各设置 2 个 $\phi 375$ 普通橡胶支座。支座 1 搁置在桥台上, 假定桥台为刚性, 不发生变形。

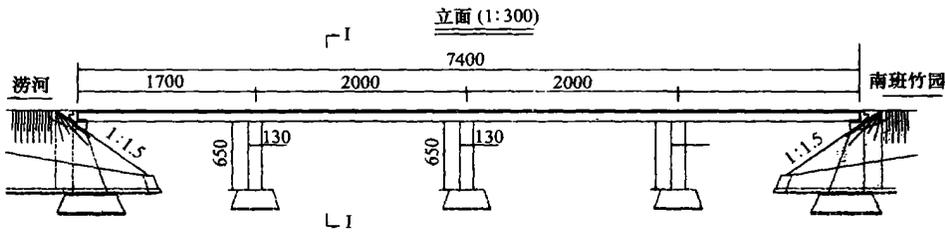


图6 桥梁立面图/cm

Fig 6 Sketch map of bridge/cm

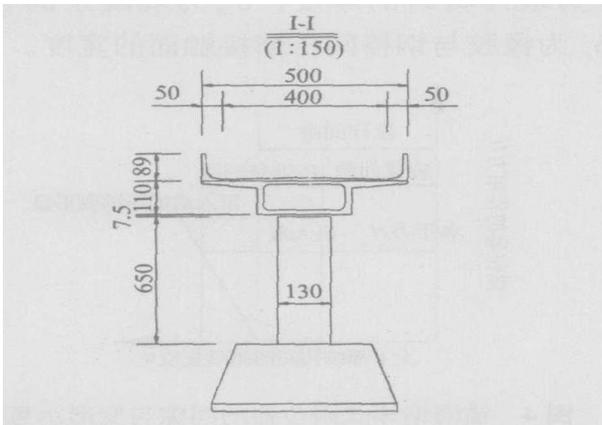


图7 桥梁横断面图/cm

Fig 7 Cross section of bridge/cm

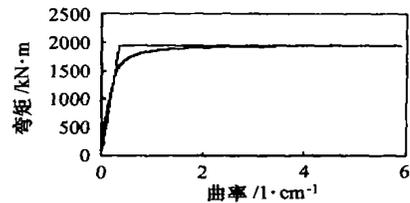


图8 2#墩的曲率-弯矩图

Fig 8 Curve of curvature and moment for 2nd pier

根据《中国地震动参数区划图》, 该桥所处地区的地面峰值加速度为 0.2g, 这里仍按照第三代地震动区划的习惯取为 8° 区域、二类场地进行抗震性能计算。由结构分析可知, 1# 墩、3# 墩和 2# 墩的轴力并不相同, 在设计中应选择不同的支座, 但是为了设计

和施工的方便, 三个桥墩所采用的支座相同, 由式 (1) 可得锚固钢棒式限位器的设计剪力约为 427.7kN。本文取限位器的刚度为橡胶支座抗剪刚度的 1~5 倍, 用反应谱法进行计算, 求得各个支座处的最大水平剪力, 如表 5 所示。

表 4 桥墩性能计算表

Tab 4 Capability of piers

| 计算参数 | 1# | 2# | 3# |
|---------------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| 屈服弯矩 $M_y/kN \cdot m$ | 1833.5 | 1944.5 | 1833.5 |
| 屈服曲率 $\varphi_y/1 \cdot m^{-1}$ | 3.6×10^{-3} | 3.6×10^{-3} | 3.6×10^{-3} |
| 塑性铰长度 L_p/m | 0.68 | 0.68 | 0.68 |
| 屈服位移/m | 0.059 | 0.059 | 0.059 |
| 极限曲率 $\varphi_u/1 \cdot m^{-1}$ | 6.26×10^{-2} | 5.9×10^{-2} | 6.26×10^{-2} |
| 塑性转角/rad | 0.0401 | 0.0377 | 0.0401 |
| 极限位移/m | 0.267 | 0.251 | 0.267 |
| 位移延性 μ_Δ | 4.53 | 4.25 | 4.53 |
| 抗推刚度 $K/kN \cdot m^{-1}$ | 4454.57 | 4724.25 | 4454.57 |

表 5 按桥梁实际情况的支座水平剪力

Tab. 5 Shear force of bearing calculated according to real condition

| μ | kN | | |
|-------|--------|--------|-------------|
| | 桥台处 | 2# 墩处 | 1# 墩和 3# 墩处 |
| 1 | 198.96 | 206.64 | 202.99 |
| 2 | 295.62 | 236.72 | 230.34 |
| 3 | 376.55 | 245.35 | 237.31 |
| 4 | 448.14 | 246.13 | 237.10 |
| 5 | 513.00 | 243.50 | 233.89 |

注: μ 为锚固钢棒式限位器的刚度与支座抗剪刚度的比值。

由表 5 可以看出, 把缓冲装置的刚度控制在 1~3 倍的支座抗剪刚度范围内, 可以有效地把上部结构的地震力和变位控制在一定的范围内, 结论和文献 [8] 中的计算结果基本一致。由前面的计算可以看出, 只要采用适当刚度的缓冲材料, 限位装置受到的水平剪力就会减小。

4 结论

(1) 限位装置和连梁装置在地震时的设计要求不同, 两种装置开始起作用的时间也不相同。

(2) 限位装置不能损害支座由温度和活荷载产生的移动、转动等功能, 不能影响支座的维修和管理; 限位器和连梁装置在地震时要求起的作用的时间和变位量不同, 限位器不能妨碍连梁装置的功能。

(3) 在支座发生破坏时, 限位装置用来防止上下部结构出现过大的相对变位, 因而其设计间隙要与支座的变形能力相同。

(4) 静力设计方法适用于锚固限位装置和连梁装置并用来防止产生落梁, 并且只适用于活动的橡胶支座或减震支座。

参考文献:

[1] 南京长江大桥抗震加固技术》编委会. 南京长江大桥抗震加固技术 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1998.

[2] 铁路工程抗震设计规范 (试行) [S].

[3] 张伯奇, 茅昌生. 马驹立交桥的加固与扩建 [J]. 公路, 2001 (11): 85-90

[4] JTJ004-89, 公路工程抗震设计规范 [S].

[5] 日本道路协会. 道路桥耐震设计指针·同解说 [S].

[6] 日本道路协会. 道路桥示方书·同解说. V 耐震设计编[M]. 2002

[7] 西川和广, 神田昌幸. 道路桥の支承部构造および落桥防止の方向 [J]. 桥梁の基础, 1996, 8: 1323-1340.

[8] 建设省. 道路桥の免震构造の开发·报告书 [R]. 平成 4 年 10 月.

[9] 杨海荣, 郑琦. 日本公路桥的抗震鉴定和加固 [J]. 国外桥梁, 1997 (2), 69-77.

[10] 日本桥梁建设协会. 落桥防止の设计の手引き [M]. 平成 14 年 8 月.