

摇摆桥墩的滞回性能及稳定性研究*

李波, 张小波

(长安大学建筑工程学院, 西安 710000)

[摘要] 以受控摇摆桥墩为研究对象,研究其滞回性能和稳定性。通过理论推导得到水平力-转角曲线及抗侧移刚度-转角曲线,并提出简化的滞回模型,采用案例详细分析阻尼器各参数对受控摇摆桥墩的滞回性能及抗侧移刚度的影响。结果表明:阻尼器的屈服强度对摇摆桥墩耗能能力有较大的影响,阻尼器其他参数不影响结构的耗能能力且对滞回性能影响较小;在受控摇摆桥墩转动过程中,桥墩自身的抗侧移刚度数值变化很小。

[关键词] 摇摆桥墩; 阻尼器; 抗侧移刚度; 滞回性能

中图分类号: TU352 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2015)S2-0519-04

Study on the hysteretic mechanics and stability of rocking bridge piers

Li Bo, Zhang Xiaobo

(School of Architecture Engineering, Chang'an University, Xi'an 710000, China)

Abstract: Based on the rocking bridge piers as the research object, the hysteretic mechanics and stability were researched. Kinds of cases were taken into account to investigate the horizontal force-rotation curve and lateral stiffness-rotation curve. Then, simplified hysteresis model was put forward. The study results show that yield strength of the damper affect energy dissipation of rocking bridge piers and other components of the damper has little effect. The lateral stiffness-rotation changes little in the process of rotation.

Keywords: rocking-bridge pier; damper; lateral stiffness; hysteretic mechanics

0 引言

公路桥梁结构是公共交通运输体系的重要组成部分,在地震发生后其作为生命线连接着医院、学校、消防站等重要场所,因此必须保证在大震发生后公路桥梁体系仍然能够正常使用。但是目前的抗震设计只能保证桥墩结构在强震作用下不会发生倒塌现象而不能满足其正常使用要求。为了满足其使用要求,国内外学者把目光放到了自复位柱上,即摇摆桥墩^[1-6]。同传统桥墩抗震设计相比,摇摆桥墩在强震作用下结构不产生残余变形,震后不需要或经过少量修复就能够恢复到正常使用范围之内,并且充分考虑其经济性以及其风险性。摇摆桥墩由预制桥墩、阻尼器和后张拉预应力钢束组成,其是由通长预应力钢束连接基础、桥墩、帽梁,使桥墩成为隔震构件的一部分。

本文对摇摆桥墩的基本力学性能和影响滞回性能参数进行了详细的论述,并在此基础上对其稳定性以及影响稳定性的各个参数进行了分析。

1 摇摆桥墩的滞回性

将摇摆桥墩的分析模型简化如图1(a)所示,考虑桥墩的受弯、混凝土受压区的影响,分析桥墩在往复荷载 F 、上部重力荷载 W 及墩柱自重 G 作用下的力学性能。设桥墩的高、宽分别为 b, h ,墩顶和墩底混凝土

受压区宽度分别为 c_1, c_2 (为计算方便, c_1, c_2 值采用等效应力图法,即假设混凝土应力分布均匀),预应力钢束的初始应力为 f_{p0} ,且在整个加载过程中其都处于弹性状态。 D_1, D_2 为粘滞阻尼器且沿墩柱预

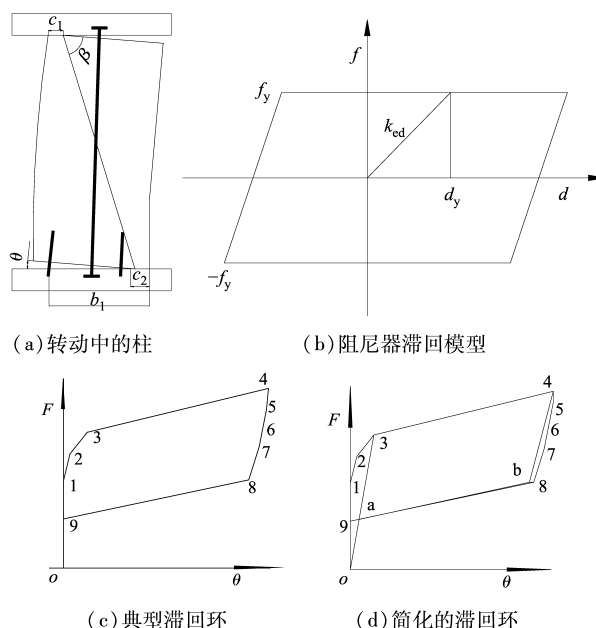


图1 摇摆桥墩分析模型

* 国家自然科学基金(51208042)。

作者简介: 李波, 博士, 副教授, 一级注册结构工程师, Email: liboxuat@163.com。

应力钢束对称布置,距柱边缘距离分别为 b_1, b_2 , 阻尼器的滞回性能如图 1(c) 所示(理想弹塑性模型)。

1.1 转动临界荷载

为了计算方便这里只考虑单向 F 作用,当 F 由零增大至临界荷载 F_{cr} 时桥墩开始绕桥墩混凝土受压区边缘转动;此时阻尼器不工作,桥墩无转角时的抗弯刚度 $k_e = 3E_c I_c / h^3$, 即在桥墩无转角时预应力钢束拉长的长度为桥墩由于弯曲变形导致顶部侧移的距离:

$$l_{so} = F_{cr} / k_e \quad (1)$$

由力矩平衡条件可知:

$$F_{cr} = Wd_1 + (G + f_{p0})d_2/h - \frac{k_p}{k_e}d_2 \quad (2)$$

式中: d_1, d_2 为上部结构重量和桥墩自重距墩底受压区边缘的距离, $d_1 = b - \frac{c_1}{2} - c_2, d_2 = \frac{b}{2} - c_2$ 。

1.2 水平力-转角滞回曲线

当 $F \geq F_{cr}$ 时墩柱发生转动,设其转角为 θ ,如图 1(a) 所示。对于典型滞回环可以定义表 1 所示的 9 个特征点,结合图 1(b) 所示的阻尼器滞回模型,可得到相应的特征点及转角。

典型滞回环的特征点及转角 表 1

点号	状态	点号	状态
1	墩柱开始转动	6	D_1 受压屈服
2	D_1 受拉屈服	7	D_2 卸载至 0
3	D_2 受拉屈服	8	D_2 受压屈服
4	开始卸载	9	墙体复位
5	D_1 卸载至 0		

由表 1 可知,特征点 3 在 $\theta_4 \leq 2\arcsin \frac{d_y}{2(b_2 - c_2)}$ 不会出现,同理特征点 8 也有可能不会出现。表中特征点 6,7 的顺序不定,当 $b_1 - c_2 \geq 2(b_2 - c_2)$ 时如表 1 的顺序,反之则相反。由图 1(b) 所示,根据力矩平衡,对受压区边缘取距有:

$$E\sqrt{(b - c_1 - c_2)^2 + h^2} \sin(\beta + \theta) = G(0.5b - c_2 - 0.5h \tan \theta) + W(b - 0.5c_1 - c_2 - h \tan \theta) + (k_p l_{sn} + f_{p0})(0.5b - c_2) \cos \frac{\theta}{2} + \sum f \left[2(b_i - c_2) \sin \frac{\theta}{2} \right] (b_i - c_2) \cos \frac{\theta}{2} \quad (3)$$

式中: $l_{sn} = 2(b - c_1 - c_2) \sin \frac{\theta}{2} + \frac{F}{k_e}$ 。

公式右端最后一项为阻尼器的抵抗弯矩。该式符合表 1 中所有的点则可以得到水平力-转角的曲线。

1.3 摇摆桥墩的耗能性能

通过前文所述可以快速得到摇摆桥墩的滞回曲线,这里为了对墩柱的耗能能力做定性的分析,对其水平力-转角曲线进行简化,将本来的“旗形”简化成“FS 形”。如图 1(d) 所示,定义点 3 的水平力为其屈服力 f_y , k_t 为结构的弹性刚度, k_s 为结构的塑性刚度, γ 为其耗能参数。简化步骤:连接 O3,34,然后过点 4 作 O3 的平行线与过 8 点作 θ 轴的平行线交与点 b,在过点 b 作 34 的平行线交 O3 于点 a。则有:

$$f_y = F_3, k_t = \frac{F_3}{\theta_3}, k_s = \frac{F_4 - F_3}{\theta_4 - \theta_3}, \gamma = \frac{F_4 - F_8}{F_3}$$

式中所有的值都可通过前文所述求得。

由图可以看出,当 γ 越大,FS 的面积就越大,相应的摇摆桥墩在滞回的过程中所消耗的能量就越多,其抗震性能也就越好。

2 摇摆桥墩的稳定性

对于摇摆桥墩来说,由于桥墩底面同基础承台通常都是断开的,那么在实际使用过程中不可避免地会担心其稳定性,稳定性主要集中在桥墩的抗转动性能和抗侧移性能上,这里定义摇摆桥墩的抗转动刚度为 k_z ,它反映摇摆桥墩的抵抗弯矩同转角 θ 的关系。当桥墩转角为 θ 时桥墩的抵抗弯矩为:

$$M_{抵抗} = G(0.5b - c_2 - 0.5h \tan \theta) + W(b - 0.5c_1 - c_2 - h \tan \theta) + (k_p l_{sn} + f_{p0})(0.5b - c_2) \cos \frac{\theta}{2} + \sum f \left[2(b_i - c_2) \sin \frac{\theta}{2} \right] (b_i - c_2) \cos \frac{\theta}{2} \quad (4a)$$

由于 θ 值很小,同时为了分析方便,假定阻尼器刚度为固定值,则有:

$$M_{抵抗} = G(0.5b - c_2 - 0.5h\theta) + W(b - 0.5c_1 - c_2 - h\theta) + (k_p l_{sn} + f_{p0})(0.5b - c_2) + \sum k_{ED}(b_i - c_2)^2 \theta \quad (4b)$$

则可以得到:

$$k_z = \frac{dM}{d\theta} = k_p(0.5b - c_2)(b - c_1 - c_2) + \sum k_{ED}(b_i - c_2)^2 - 0.5Gh - Wh \quad (5)$$

转动刚度决定结构的整体稳定性,当转动刚度 $k_z \leq 0$ 时结构失去稳定,会发生结构整体性垮塌。通过公式可以看出预应力钢束、阻尼器参数影响摇摆桥墩的转动刚度。

至于桥墩的抗侧移刚度,这里忽略桥墩上部荷载以及桥墩自重的影响,考虑预应力钢束和阻尼器对抗侧移刚度的影响,则有:

$$\overline{k_c} \approx 1 / \left(\frac{1}{k_c} + \frac{h\theta}{M_{抵抗}} \right) \quad (6)$$

式中: k_c 为桥墩的抗弯刚度; $\frac{M_{\text{抵抗}}}{h\theta}$ 为摇摆桥墩中预应力钢束和阻尼器的抗侧移刚度。

摇摆结构抗震就是通过结构发生转动使结构刚度发生退化,从而增加其自振周期以抵抗水平地震作用。所以对于摇摆桥墩来说,其抗侧移刚度越小,桥墩的抗震性能也越强,稳定性越差。所以又规定了抗侧移刚度的上下限,上限为桥墩的抗弯刚度,下限为初始预拉力为0的刚度。

3 阻尼器对摇摆桥墩滞回性能及稳定性的影响

根据前文所述,通过算例对影响摇摆桥墩性能的阻尼器参数进行分析(f_y , k_{ED} 及位置 b_i)。设摇摆桥墩的几何尺寸为 $900\text{mm} \times 900\text{mm} \times 4800\text{mm}$, 上部结构自重 $W = 1860\text{kN}$, 桥墩自重 $G = 97.2\text{kN}$, 预应力钢束参数为 $f_{p0} = 94.23\text{kN}$, $k_p = 56.14\text{kN/mm}$; 阻尼器各参数设置如表2所示,此外荷载横向位移幅值最大控制在2%,即有 $\theta_4 = 0.02$, 桥墩采用C40混凝土浇筑。

阻尼器各参数设置

表2

b_i/mm	f_y/kN	$k_{ED}/(\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$
600	30.43	80.36
650	51.35	102.56
750	97.47	175.37

3.1 阻尼器的位置 b_i

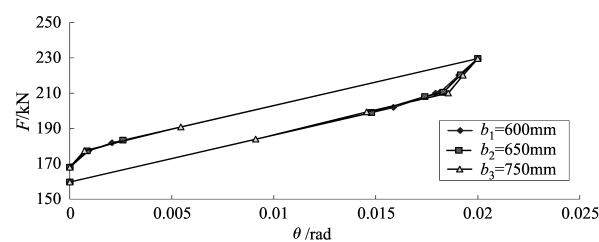
阻尼器的位置 b_i 根据表2发生变化,阻尼器其余参数保持不变,分别取: $f_y = 51.35\text{kN}$, $k_{ED} = 102.56\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$; 根据前式得到水平力-转角曲线以及桥墩的抗侧移刚度曲线如图2所示。可以看出:1) b_i 变化时水平力-转角曲线几乎没有变化,即阻尼器位置几乎不影响水平力-转角曲线;2) 结构抗侧移刚度变化较为复杂,初步判断主要是因为阻尼器对称布置, b_i 大则 b_2 小,不容易统一。

3.2 阻尼器的屈服强度 f_y

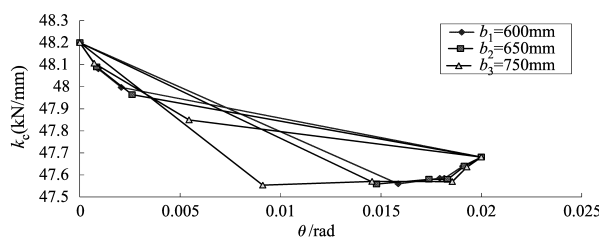
阻尼器的屈服强度 f_y 根据表2发生变化,其余参数保持不变,分别取: $b_i = 650\text{mm}$, $k_{ED} = 102.56\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$; 根据前式得到水平力-转角曲线以及桥墩的抗侧移刚度曲线如图3所示。可以看出:1) f_y 越大,结构卸载之前其水平力越大,卸载后则越小; f_y 越大其滞回环的面积越大,即其耗能能力越强。2) 抗侧移刚度卸载前随 f_y 增大而减小,卸载后抗侧移刚度趋于一致。

3.3 阻尼器的刚度 k_{ED}

阻尼器的刚度 k_{ED} 根据表2发生变化,其余参数保持不变,分别取: $b_i = 650\text{mm}$, $f_y = 51.35\text{kN}$; 根据前

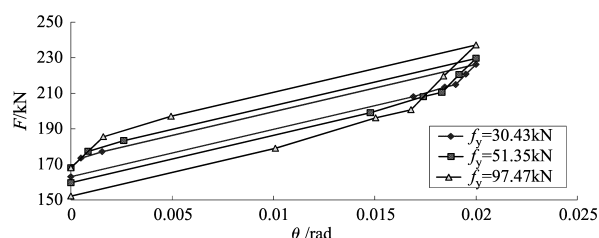


(a) 水平力-转角曲线

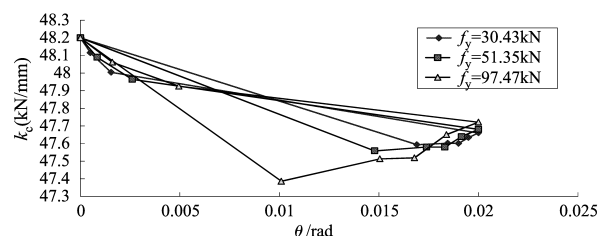


(b) 抗侧移刚度曲线

图2 b_i 变化时水平力-转角曲线和抗侧移刚度曲线

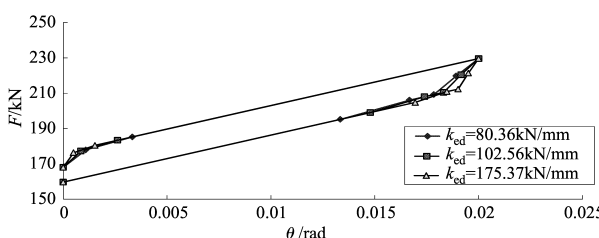


(a) 水平力-转角曲线

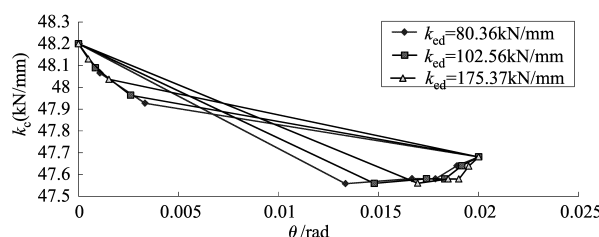


(b) 抗侧移刚度曲线

图3 f_y 变化时水平力-转角曲线和抗侧移刚度曲线



(a) 水平力-转角曲线



(b) 抗侧移刚度曲线

图4 k_{ED} 变化时水平力-转角曲线和抗侧移刚度曲线

式得到水平力-转角曲线以及桥墩的抗侧移刚度曲线如图4所示。可以看出:1)阻尼器刚度变化对结构耗能能力以及水平力-转角曲线几乎没有影响;2)抗侧移刚度随着阻尼器刚度增大而增大,变化较显著。

4 结 论

文章主要分析摇摆桥墩在静力荷载作用下的反应,在实际应用过程中要充分考虑其在动力以及在位移荷载作用下的反应。通过分析可以得到:

(1)阻尼器对摇摆桥墩的抗侧移性能有一定的影响,但总的来说其影响并不是很大,即桥墩的抗侧移刚度的上限和下限范围不大。

(2)摇摆桥墩的耗能能力主要由阻尼器的屈服强度决定;阻尼器其他参数对其耗能性能影响小。

(3)阻尼器不影响摇摆桥墩的转动临界荷载。

参 考 文 献

[1] MAKRI S N, KONSTANTINIDIS D. The rocking spectrum and the limitations of practical design methodologies[J].

Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2003, 32(2):265-289.

[2] PALERMO A, PAMPANIN S, CALVI G M. Concept and development of hybrid solutions for seismic resistant bridge systems[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2005, 9(6):899-921.

[3] 周颖,吕西林. 摇摆结构及自复位结构研究综述[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(9):1-10.

[4] 郭佳,辛克贵,柯铭华,等. 自复位桥梁墩柱结构抗震性能试验研究与分析[J]. 工程力学, 2012, 29(S1): 29-45.

[5] 何铭华,辛克贵,郭佳,等. 自复位桥墩的内标侧移刚度和滞回机理研究[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(5):22-27.

[6] 何铭华,辛克贵,郭佳. 新型自复位桥梁墩柱节点的局部稳定性研究[J]. 工程力学, 2012, 29(4): 122-127.

[7] HWANGH,刘晶波. 地震作用下钢筋混凝土桥梁结构易损性分析[J]. 土木工程学报, 2004, 37(6):47-51.