

文章编号: 1000-4750(2012)04-0122-06

新型自复位桥梁墩柱节点的局部稳定性研究

何铭华^{1,2,3}, 辛克贵^{1,2,3}, 郭 佳^{1,2,3}

(1. 清华大学土木工程系, 北京 100084; 2. 土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084; 3. 清华大学结构工程检测中心, 北京 100084)

摘 要: 为了更好地控制结构震后残余变形, 增强桥梁结构自复位性能, 最大限度地强化震后继续服役的能力和增加再修复的可能, 该文基于性能设计的理念, 给出一种新型自复位桥梁墩柱节点体系的基本概念, 并选取该体系的典型模型进行截面弹性承载力、滞回特性、设计控制参数等力学性能进行初步的推导和分析。研究结果初步表明, 该自复位桥梁墩柱节点结构受力明确, 构造合理巧妙, 由于嵌合式接头限制了体系最小势能位置, 能够帮助结构复位, 震后残余变形小, 震后弹性承载力不下降, 能够满足对结构性能的更高要求。

关键词: 自复位; 基于性能; 嵌合式接头; 残余变形; 自复位性能

中图分类号: TU391; TU279.72 **文献标志码:** A

LOCAL STABILITY STUDY OF NEW BRIDGE PIERS WITH SELF-CENTERING JOINTS

HE Ming-hua^{1,2,3}, XIN Ke-gui^{1,2,3}, GUO Jia^{1,2,3}

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Key laboratory for Civil Engineering Safety and Durability of Education Ministry, Beijing 100084, China;

3. Tsinghua Testing Center of Structural Engineering, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to minimize post-earthquake residual structural deformation, to enhance seismic self-centering ability of bridge structures and to promote the continuous service condition with limited repair or even without retrofit, a series of new concepts of self-centering bridge pier joints has been presented. Based on a typical self-centering bridge pier joint structure, some mechanical factors including the flexural strength, hysteretic characteristics, working characters and control parameters have been derived and analyzed. The proposed joint that constrains the minimum potential position of the system, can help the structure reset. The paper shows that the unambiguous mechanical system of self-centering bridge pier joint has little post-earthquake residual deformation, prevents the elastic strength from weakening and holds the flexibility for construction, which can better satisfy more rigorous seismic requirements for next generation bridge system.

Key words: self-centering; performance based; tongue-groove joint; residual deformation; self-centering ability

近年来, 基于性能设计的桥梁抗震研究和设计越来越多地着眼于提升桥梁结构震后性能, 以保证交通生命线的畅通, 以期通过对结构的巧妙设计, 最大限度地减少地震损失。与上部结构和基础承台相比, 桥墩抗震性能更加重要。过去基于延性的桥墩设计主要着眼于确保结构在遭遇极端荷载的情

形下(如地震、爆炸、车船碰撞等)的结构安全, 并没有对短暂的极端荷载作用过后的结构性能给予足够的重视。在地震过后, 即便结构不发生倒塌, 也会因为发生了过大的不可恢复的塑性残余变形, 而最终仍然需要被拆除、重建。1995年兵库县南部地震中大约 250 座钢筋混凝土桥墩柱和 20 座钢桥

收稿日期: 2010-07-09; 修改日期: 2011-04-14

基金项目: 国家自然科学基金高速铁路基础研究联合项目(U1134110); 国家自然科学基金项目(50878117); 国家自然科学基金重点项目(51038006); 清华大学自主科研计划项目(2010081766)

通讯作者: 辛克贵(1950—), 男, 四川人, 教授, 博士, 博导, 中心主任, 从事粘聚和有有限元、结构与桥梁工程研究(E-mail: xkg-dci@tsinghua.edu.cn).

作者简介: 何铭华(1984—), 男, 广东人, 博士生, 从事粘聚和有有限元、结构与桥梁工程研究(E-mail: hmh03@mails.tsinghua.edu.cn);

郭 佳(1987—), 女, 北京人, 硕士生, 从事粘聚和有有限元、结构与桥梁工程研究(E-mail: guoguo42@sina.com).

墩柱在强震中倒塌; 100 余座桥墩因为墩柱倾斜超过 1° 或者顶部偏移超过 1.75%, 影响了继续服役的性能需求而被拆除, 造成了巨大的经济损失, 这个教训引发了 Macrae 等(1997)^[1]对残余变形的研究, Kawashima 等(1998)^[2]为抗震设计建立了残余变形响应谱。在过去基于延性设计中的混凝土墩柱或者钢墩柱中, 预设的截面延性变形机制主要通过墩柱的结构材料如钢材或者混凝土的屈服形成截面塑性铰来实现, 在中等地震强度的情况下就会发生, 导致不可忽略的残余变形, 带来了 4 点不足: 1) 截面延性变形过大且难以局部恢复, 导致需要被整体拆除; 2) 即便延性变形在限值以内, 设计截面的承载力和刚度都出现了明显的下降, 对继续服役造成不利的影响; 3) 对于交通生命线上的桥墩拆除和重建会阻碍震后交通恢复通行; 4) 直接造成巨大的经济损失。在这样的现实状况下, 工程界需要寻求更加先进的设计方案以及更为严格的桥梁抗震设计规范准则(见 Kawashima 等(1994)^[3])。

如图 1 所示, 人体骨架自由活动关节依赖于肌肉、肌腱等约束来传递荷载, 支撑身体运动; 卸载后保证骨头复位。本文基于性能设计的思想, 类似地在桥梁墩柱节点的设计中, 着眼于控制残余变形, 设置相应的机制保证复位, 提出了一系列新型自复位桥梁墩柱节点体系。

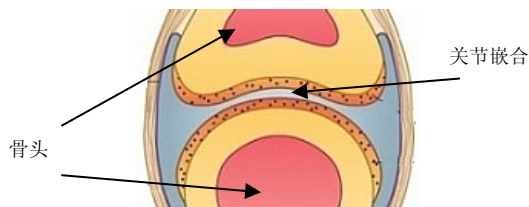


图 1 自由活动关节示意

Fig.1 Diagrammatic section of a diarthrosis

1 研究现状与概念

早在 1996 年, 美国华盛顿大学的 Stanton^[4]就提出了混合预制框架系统这一概念, 该系统选用无粘结预应力钢筋与普通粘结钢筋共同受力的方式, 经过大量实验, 得出了混合预制混凝土框架在地震中的受力性能并不弱于传统现浇框架这一结论。Christopoulos 等(2002)^[5]通过循环加载实验, 验证了具有自复位能力的钢框架体系的优越性能, 他对安装有沿梁长分布的自复位钢绞线以及安装在梁上翼内侧, 并沿梁长分布耗能钢筋的框架梁柱节点进行了模拟分析和实验研究。Priestley 等(1999)^[6]将该杂交概念从框架推广到了剪力墙体系。在桥梁墩柱

节点方面, Palermo 等(2008)^[7]做了较多工作, 他们进行了大量自复位桥梁墩柱节点的拟静力推拉实验和非线性时程分析, 并将单自由度的墩柱节点推广到了多自由度的整桥简化模型, 在数值模拟方面, 他们选用简化的弹簧模型来模拟自恢复节点的性能, 所得结果与实验吻合较好。

为了强化桥梁结构自复位的能力, 通过研究延性节点构造以及桥梁的非线性响应(见 Kawashima 等(1994)^[8]), 学者开始关注残余变形的度量和相关研究(见 Kawashima 等(1998)^[2]), 并且逐步形成了基于性能设计在桥梁中的指标。与此同时, Palermo 等(2005)^[9]给出了以 Hybrid 桥梁体系为代表的结构方案, 采用平齐端面对接, 外加贯穿全墩柱轴心位置的预应力钢束进行墩柱与基础连接。这个方案减小了墩柱的残余变形, 但是带来 2 个问题: 1) 通长的预应力钢束对墩柱稳定性有不利影响, 特别是钢墩柱, 由于稳定性的限制无法应用实施; 2) 端面平齐对接, 剪力传递依赖于界面摩擦, 缺乏更为可靠的剪力传递机制, 体系稳定性较差, 且可能造成高应力状态下预应力钢束的剪切破坏。

如图 2 所示, 新型自复位桥梁墩柱节点采用了墩柱端中部相互咬合镶嵌、外围平面抵紧的墩柱端部接头设计, 墩柱轴心位置采用了无粘结预应力钢束施加预应力, 形成墩柱与基础顶面的可靠连接。这里给出墩柱端接头的两类形式: 锥入式关节接头和球入式关节接头(如图 3 所示)。采用这些镶嵌式的接头, 能够保证墩柱端的剪力传递机制, 限制柱端滑移, 保护预应力钢索不受剪切损坏, 从而形成更加可靠的连接。

为了保证该关节截面有足够的能量耗散能力, 在截面周边设置了足够的屈服耗能组件, 保证截面有足够的延性耗能能力。如图 4 所示, 墩柱长细比

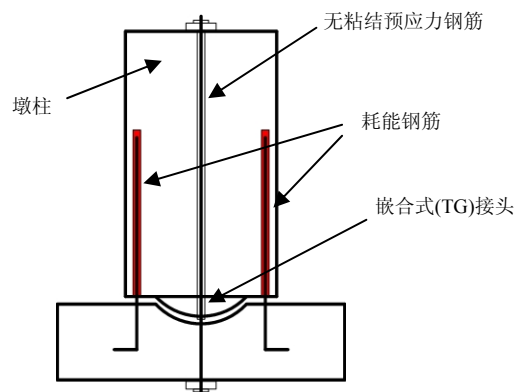


图 2 新型自复位桥梁墩柱节点

Fig.2 The new pier with self-centering joint

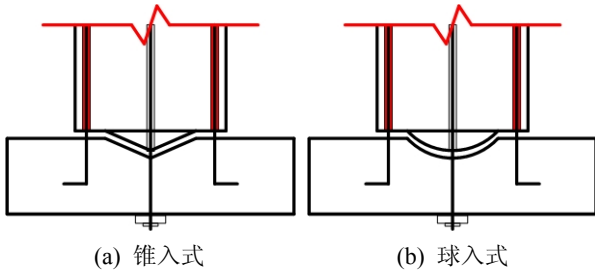


图3 两种典型墩柱接头

Fig.3 Two typical joints

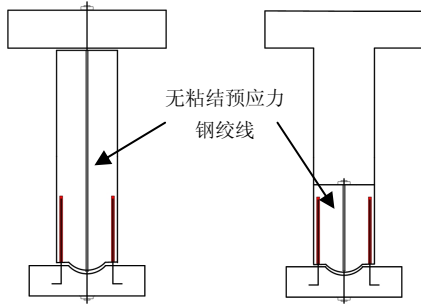


图4 贯穿式和柱端局部式的无粘结后张拉预应力钢束

Fig.4 Whole-pier and pier-ended post-tensioned steel strands

较小时,在不影响桥墩稳定性的情况下,预应力钢束可以贯穿全墩柱;墩柱长细比较大时,贯穿设置方式由于可能对墩柱的稳定性造成明显不利的影 响,因此需要采用仅在墩柱端部设置预应力钢束的柱端局部式(见图4)。

新型自复位桥梁墩柱节点作为一种预设变形机制的桥梁力学体系,可以适用于当前桥梁墩柱的各类工程材料和形式。通过制作适当的墩柱端头,墩柱节点可以应用于混凝土柱、钢柱、钢管混凝土柱、FRP约束混凝土柱等诸多结构类型,适用面广。由于新型自复位桥梁墩柱的柱端局部式(见图4)节点有效消除了自复位预应力钢束对墩柱特别是柔性墩柱的整体稳定性的消极影响,结构更为安全,施工更为灵活,适用性强;而贯穿式又可以看成柱端局部式的一种特例,因此本文的分析将集中讨论柱端局部式的自复位桥梁墩柱节点。

2 承载力分析模型

如图5所示,自复位桥梁墩柱节点的典型体系的预应力施加方式为端部局部式,墩柱端部接头采用了球入式接头来实现剪力传递、保护预应力钢束,保证墩柱定位限位。在弹性范围内,小变形下的墩柱端截面弯矩为:

$$M(\theta) = M_G + M_U + M_{ys} \quad (1)$$

其中, M_G 、 M_U 、 M_{ys} 分别为结构自重、预应力和耗能构件提供的截面弯矩贡献项。

结构自重提供的弯矩 M_G 为:

$$M_G = G_{sup}(\bar{B}_T - H\theta) + G_c(\bar{B}_T - 0.5H_c\theta) \quad (2)$$

其中: $\bar{B}_T = 0.5(B_T - d)$; G_{sup} 为上部结构自重,实际分析中,可以是上部结构永久荷载与活荷载的最不利设计工况组合值; G_c 为墩柱本身结构自重; B_T 为横桥向墩柱宽度。相应地, B_L 为纵桥向墩柱宽度; d 为接头截面局部屈服宽度,按照(2%~5%) B_T 取值; H 为计算墩柱高,为基础顶面到上部结构重心的垂直距离; H_c 为自复位桥梁墩柱节点柱高; θ 为墩柱端面转角。

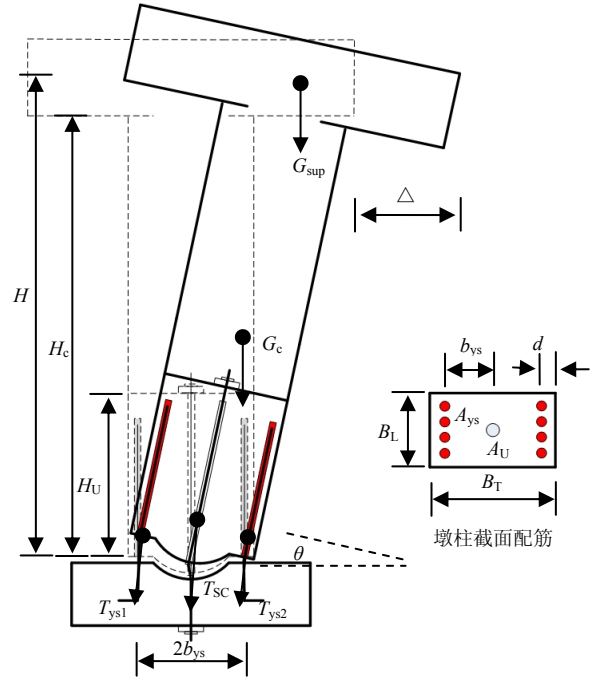


图5 自复位桥梁墩柱节点典型体系分析模型

Fig.5 Typical model of self-centering bridge piers

如图5 预应力钢束截面积为 A_U , 设无粘结预应力钢束的弹性模量为 E_U , 则预应力弯矩贡献项为:

$$M_U = (E_U A_U \theta / l_U + N_0 / \bar{B}_T) \bar{B}_T^2 \quad (3)$$

其中: l_U 为预应力钢束长度; N_0 为初始预应力。

耗能组件可以采用常用的热轧钢筋、球墨铸铁等延性好的材料制作,则钢筋在弹性变形阶段提供的弯矩贡献项为:

$$M_{ys} = T_{ys1} \bar{B}_{ys1} + T_{ys2} \bar{B}_{ys2} \quad (4)$$

式中, $\bar{B}_{ys1} = b_{ys} + \bar{B}_T$, $\bar{B}_{ys2} = \bar{B}_T - b_{ys}$, 假定:

$$\bar{B}_{ys2} \approx 0 \quad (5)$$

则式(4)近似为:

$$M_{ys} \approx T_{ys1} \bar{B}_{ys1} = (E_{ys1} A_{ys1} / L_{ys1}) \bar{B}_{ys1}^2 \theta \quad (6)$$

其中: E_{ys1} 为耗能组件弹性模量; A_{ys1} 为耗能组件的面积; L_{ys1} 为截面钢筋拉压耗能影响长度,与耗能

钢筋预留无粘结段有关。

把式(2)、式(3)、式(6)代入式(1)中,可以得到小变形弹性范围内墩柱端面承载力。

当 $\theta = 0$ 时, 墩柱端面抗弯承载力为:

$$M_0 = (N_0 + G_{sup} + G_c) \bar{B}_T \quad (7)$$

若取 $d=0.04B_T$, 则式(7)近似为:

$$M_0 = 0.48(N_0 + G_{sup} + G_c) B_T \quad (8)$$

这种情况相当于墩柱完全固接边界条件, 由于预应力和自重的预压, 当墩柱端面弯矩 $M \leq M_0$ 的时候, 无弹性转角出现, 自复位墩柱节点处于弹性无墩柱端面转角状态。

当 $\theta > 0$ 时, 类似于材料稳定性的要求, 为了保证受力截面以及墩柱体系的稳定性, 要求满足:

$$dM/d\theta \geq 0 \quad (9)$$

局部稳定性临界转角 $\theta^* = 0$ 为局部稳定性最低要求(见图 6)。墩柱端截面为小转角时候, 局部线性化 M , 则可以得到一阶导数需要满足非负条件:

$$-G_{sup}H - 0.5H_cG_c + K_U \bar{B}_T^2 + K_{ys1} \bar{B}_{ys1}^2 \geq 0 \quad (10)$$

式中, $K_U = E_U A_U / l_U$ 和 $K_{ys1} = E_{ys1} A_{ys1} / L_{ys1}$ 分别为无粘结预应力钢束和耗能钢筋的弹性贡献。

从式(10)可以得到维持自复位桥墩局部稳定性, 预应力钢筋长度满足:

$$l_U \leq E_U A_U \bar{B}_T^2 / (G_M - K_{ys1} \bar{B}_{ys1}^2) \quad (11)$$

其中:

$$G_M = G_{sup}H + 0.5G_cH_c \quad (12)$$

式(11)反映了对无粘结预应力钢束长度要求, 如果预应力钢束的有效长度太长, 例如贯穿式布置, 则有可能无法复位。为了保证预备足够的转动复位能力, 在选定了预应力钢束的截面积或者钢丝数目的情况下, 必须限制预应力钢束锚固端间的长度, 保证足够的刚度。

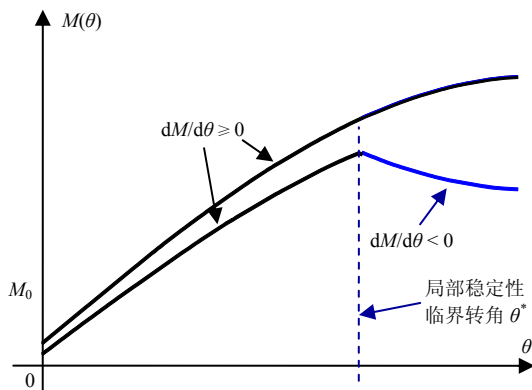


图 6 自复位墩柱截面弯矩稳定性要求

Fig.6 Stability of section moment of self-centring bridge piers

通过设置耗能组件, 自复位墩柱节点的滞回耗能性能优异, 塑性耗能集中可控, 且截面整体体现出零残余变形的特性。

不失一般性, 假设耗能钢筋本构为理想弹塑性钢材本构关系, 不考虑应变硬化的 Bauschinger 效应, 则单周滞回曲线如图 7 所示, 滞回曲线在 0 点处体现出很好的拢紧特点, 无残余变形。实际工程应用中, 端部镶嵌式接头可以采用高强混凝土浇制, 也可以采用钢材制作。由于混凝土的抗拉强度较低, 在局部承压时, 由于应力集中等综合因素, 容易被压溃导致预设变形机制失效, 为了更好地避免这种现象出现, 建议采用高性能钢材(如 HPS50W, HPS70W 甚至 HPS90W)来制作镶嵌接头, 使得预设变形机制能得到有效保证和实现, 使得结构更加安全可靠。

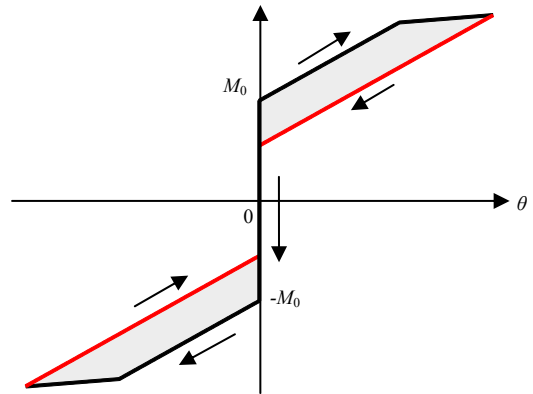


图 7 自复位墩柱端面滞回曲线

Fig.7 Hysteretic curve of self-centring bridge pier

3 算例分析

为了满足公路一级桥梁抗震要求, 并着眼于更强的结构性能, 本文基于性能设计, 以位移控制为设计目标, 顶部残余偏移限值取 1.5%墩柱高, 设计如图 8 所示的单墩自复位墩柱节点桥。

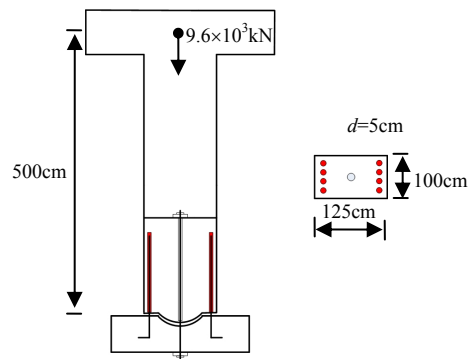


图 8 自复位墩柱节点桥设计样例

Fig.8 Prototype self-centring bridge with single pier

有效计算墩高 $H=500\text{cm}$, 为基础顶面至上部结构重心的竖直距离; 墩柱截面形状为矩形, 尺寸为横桥向宽度 $B_1=125\text{cm}$, 纵桥向宽度 $B_L=100\text{cm}$ 。自复位桥墩高宽比 $H/B_1=4$ 。采用 HRB400 作为耗能组件, 弹性模量 $E_{ys}=2.0\times 10^5\text{MPa}$, 屈服强度 360MPa , 极限抗拉强度 400MPa ; 采用 8.6mm 钢绞线, 极限抗拉强度 1860MPa , 屈服强度 1320MPa ; 混凝土选用 C50, 弹性模量 $3.45\times 10^4\text{MPa}$, 抗压强度 23.1MPa 。

公路桥梁抗震设计细则(2008)^[13]中规定, 在抗震作用下, 规则桥梁重力式桥墩顺桥向和横桥向的水平地震力, 可采用反应谱方法计算, 且一般情况下只考虑水平方向地震作用, 不考虑竖直方向, 本文选用单振型反应谱法计算该桥受到的地震力作用。细则中规定结构在 E_1 地震作用下在弹性范围内工作基本不损伤, 在 E_2 作用下结构延性构件可发生损伤产生塑性变形耗散地震能量但延性构件的塑性铰需具有足够塑性变形能力。

本算例桥梁抗震设防类别设为 B 类, 抗震设防烈度为 8 度, 抗震设防措施等级为 9 级, 场地类型为 III 类。对于 8 度抗震设防烈度, 其水平向基本地震动加速度峰值 $A=0.30g$, 水平设计加速度反应谱最大值为:

$$S_{\max} = 2.25C_i C_s C_d A \quad (13)$$

式中参数通过查表可知本例中, E_1 对应的 $C_i=0.43$; E_2 对应的 $C_i=1.3$, $C_s=1.2$, $C_d=1$ 。故对于 E_1 地震作用, $S_{\max}=0.35g$; 对于 E_2 地震作用, $S_{\max}=1.1g$ 。本结构基频近似计算为:

$$T_1 = 2\pi\sqrt{G_t\delta/g} = 2\pi\sqrt{G_t/K_{up}g} = 0.55\text{s} \quad (14)$$

特征周期 $T_g=0.65\text{s}$, 若 $0.1\text{s} \leq T \leq T_g$, 则水平设计加速度反应谱 $S=S_{\max}$ 。对于规则桥梁的柱式墩, 采用反应谱法计算时, 其顺桥向水平地震力为:

$$E_{\text{htp}} = S_{\text{h1}} G_t / g \quad (15)$$

其中, G_t 为支座顶面处的换算质点重力, 本桥为 20000kN , 故本桥顺桥向地震力分别为 $7000\text{kN}(E_1)$ 和 $22000\text{kN}(E_2)$ 。横桥向与顺桥向算法相同。

基于这样的抗震设计条件, 可以进行传统桥墩以及新型自复位桥墩设计, 并进行对比。按照传统墩柱设计, 截面处于大偏压状态, 采用双面配筋, 配筋面积不小于 $A_{ys}=15204.3\text{mm}^2$ 。每侧采用 12 根直径 40mm 钢筋, 全截面共 44 根钢筋。自复位墩柱节点处, 预留 4 根直径 40mm 的 HRB400 钢筋作为耗能组件, 选用预应力钢绞线截面积为

1407mm^2 , 预张拉 1545kN 。此外, 在抗震动力性能研究中, Uang 等(1990)^[11]指出可以按照 SDOF 体系进行分析。按照规范要求, 检验两种设计是否符合强度、刚度要求, 即顺桥向和横桥向 E_1 地震作用效应和永久效应组合, 按现行公路桥涵设计规范相关规定验算桥墩的强度, 在 E_2 地震作用下验算了桥墩潜在塑性铰区域沿顺桥向和横桥向的塑性转动能力, 对于规则桥, 则可直接验算墩顶位移。经过验算两种配筋方式均满足抗震规范中的要求。

可以初步判断, 新型自复位桥梁墩柱节点设计用量与传统墩柱设计相差无几, 且能有效达到和满足桥梁抗震设计的规范要求。与此同时, 耗能组件设置简单易于操作, 结构体系清晰, 预应力钢束设置可以形成有效连接以及复位能力。值得说明的是, 限于篇幅, 本文算法未考虑残余变形在自复位桥墩设计的作用, 考虑残余变形和基于性能的新型自复位桥墩设计方法将另文介绍。

4 结论

基于性能设计的理念, 本文提出了一类新型自复位桥梁墩柱节点的基本概念, 对典型模型的截面弹性承载力、滞回性能等关键力学性能进行了初步的分析和讨论, 讨论了自复位桥梁墩柱节点的力学特点。其主要优点小结有:

(1) 设计应用灵活。墩柱高度较小的情况下, 采用贯穿式的预应力施加方式; 墩身高度大, 则采用柱端局部式来施加无粘结预应力钢筋, 限制墩柱节点预应力钢束仅分布在局部墩身。局部式施加预应力降低了对墩柱稳定性的要求, 对墩柱高度变化不敏感, 适用性更强。

(2) 墩柱节点端部接头可采用高性能钢材制作, 满足端部接头接触不均匀的局部承压要求, 避免混凝土接头的局部压溃导致的预设变形机制失效, 同时增强施工的便利性。

(3) 合理设计后, M_0 可以达到整体固连设计的墩柱端部截面的屈服弯矩, 因此有效保证了结构整体抗弯刚度不下降。

(4) 嵌入式的接头设计, 有助于墩柱施工定位接合, 限制了横向位置增强体系稳定性; 提供了更为可靠的横向剪力传递机制, 保护了高张拉应力状态下的预应力钢束不会在墩柱端面与基础顶面的横向错位中遭受破坏。

初步表明, 新型自复位受力明确, 构造合理,

震后残余变形小,震后弹性承载力基本不下降,能够很好地满足对桥梁结构抗震性能的更高要求,值得在未来抗震桥梁体系设计应用中进一步推广研究。

参考文献:

- [1] Macrae G A, Kawashima K. Post-earthquake residual oscillators [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1997, 26(7): 701—716.
- [2] Kawashima K, Macrae G, Hoshikuma J, Nagaya K. Residual displacement response spectrum and its application [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1998, 124(5): 523—530.
- [3] Kawashima K, Hasegawa K. New seismic design specifications of highway bridges in Japan [J]. *Earthquake Spectra*, 1994, 10(2): 333—356.
- [4] Stanton J, Stone W, Cheok G. A hybrid reinforced precast frame for seismic regions [J]. *PCI Journal*, 1997, 42(2): 20—32.
- [5] Christopoulos C, Filiatrault A, Uang C M, Folz B. Post-tensioned energy dissipating connections for moment-resisting steel frames [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2002, 128(9): 1111—1120.
- [6] Priestley M, Sritharan S, Conley J. Preliminary results and conclusions from the PRESSS five-story precast concrete test building [J]. *PCI Journal*, 1999, 44(6): 42—67.
- [7] Palermo A, Pampanin S. Enhanced seismic performance of hybrid bridge systems: Comparison with traditional monolithic solutions [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2008, 12(8): 1267—1295.
- [8] Kawashima K, Hasegawa K. Experimental investigation on nonlinear seismic response of bridge columns and accuracy of equal energy assumption [C]// *Proceedings of Japan Society of Civil Engineering*. Tokyo, Japan, 1994, 483(26): 137—146.
- [9] Palermo A, Pampanin S, Calvi G. Concept and development of hybrid systems for seismic-resistant bridges [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2005, 9(6): 899—921.
- [10] JTG/T B02-01-2008, 公路桥梁抗震设计细则[S]. 北京: 人民交通出版社出版, 2008.
JTG/T B02-01-2008, Guidelines for seismic design of highway bridges [S]. Beijing: China Communications Press, 2008. (in Chinese)
- [11] Uang C, Bertero V V. Evaluation of seismic energy in structures [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1990, 19(1): 77—90.

(上接第 121 页)

- [7] 赵雅丽, 全涌, 黄鹏, 等. 典型双坡屋面风压分布特性风洞试验研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(11): 1586—1592.
Zhao Yali, Quan Yong, Huang Peng, et al. Wind Tunnel test study on wind pressure on typical gable roofs of low-rise buildings [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2010, 38(11): 1586—1592. (in Chinese)
- [8] GB 50009-2001, 建筑结构荷载规范(2006年版)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
GB 50009-2001, Load code for the design of building structures (2006 edition) [S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [9] Davenport A G. Note on the distribution of the largest value of a random function with application to gust loading [J]. *Journal Institution of Civil Engineering*, 1964, 24: 187—196.
- [10] Lythe G, Surry D. Wind loading of flat roofs with and without parapets [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1983, 11(1/2/3): 75—94.