

设置 BRB 桥梁排架墩基于位移抗震设计方法

石岩¹ 王东升² 韩建平¹

(1. 兰州理工大学, 甘肃兰州 730050; 2. 河北工业大学, 天津 300401)

摘要: 基于“保险丝”和“损伤控制”的抗震设计理念, 提出在桥梁双柱式排架墩中通过设置屈曲约束支撑(BRB)以提高其横向抗震性能的构想。首先从获得“抗震能力”的角度对设置 BRB 桥梁排架墩的抗震设计参数进行系统性分析, 推导出与剪跨比和墩柱间距与直径(边长)比相关的 BRB 核心段最大和最小长度取值范围; 再从求解“地震需求”角度建立了设置保险丝的(SDOF)主结构体系弹塑性反应谱基本方程, 分析该体系的非线性地震反应一般规律; 然后, 基于体系的“抗震能力”和“地震需求”, 发展了设置 BRB 的桥梁排架墩基于位移的抗震设计方法, 并结合一个具体桥梁排架墩实例说明建议设计方法的可行性。

关键词: 桥梁工程; 基于位移抗震设计; 双柱式排架墩; 屈曲约束支撑; 弹塑性反应谱

中图分类号: U442.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-431X(2017)07-0062-08

DOI:10.15951/j.tmgcxb.2017.07.007

Displacement-based design method for bridge bents with buckling-restrained braces (BRBs)

Shi Yan¹ Wang Dongsheng² Han Jianping¹

(1. Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: Based on the concept of structural fuse, the buckling-restrained braces (BRBs) were proposed to be used in the bridge bents with double columns to improve the seismic performance of bridge in transverse direction. The seismic design parameters of bridge bents with BRBs were systematically analyzed. The relationship between length of the BRBs core and shear span ratio, the ratio of intercolumniation and diameter or side length of the pier section is derived from the viewpoint of seismic capability for the new structural system, and the length range of core section of BRBs was also determined. The elasto-plastic response spectra for a single-degree-of-freedom (SDOF) system with structural fuse was developed from the perspective of seismic demand, so that they are given in a format of easy use for the design of similar structures with a wide range of response characteristics. Furthermore, the displacement-based design method of bridge bents with BRBs was proposed based on the seismic capability and demand. Finally, the feasibility of the proposed method was validated by using the seismic design for a bridge bent example.

Keywords: bridge engineering; displacement-based seismic design; bent with double columns; buckling-restrained braces (BRBs); elasto-plastic response spectra

E-mail: syky86@163.com

引言

将结构体系中非关键构件设计为先于主要关键构件屈服, 地震中非关键构件通过滞回反应来耗能, 达到保护关键构件的目的, 且非关键构件震后易于替换, 称为基于保险丝的设计理念。目前在框架结构中设置屈曲约束支撑(Buckling-Restrained Brace, 简称

BRB) 来提高其抗震能力是比较常用的减震方式之一^[1-2], 但 BRB 在桥梁结构应用相对较少, 前期主要是将 BRB 作为钢拱桥斜撑或钢梁(桁架)桥的延性横隔板, 如 Usami 等^[3]将 BRB 应用在钢拱桥的斜撑中, 利用 BRB 的耗能作用以提高钢拱桥的抗震能力; Carden 等^[4]通过试验研究了在钢梁端截面处设置 BRB 的抗震性能, 发现 BRB 的大变形能力对减小基底剪力起关键作用; Celik 等^[5]将 BRB 应用在钢板梁和钢桁架桥中的梁端横隔板处, BRB 起到延性保险丝和耗能的作用; Lanning 等^[6]以 Vincent Thomas 大桥为背景, 研究了 BRB 应用在大跨度悬索桥中抵抗近断层地震动作用的可行性。近年来, El-Bahey 等^[7]则将 BRB 应用在

基金项目: 国家自然科学基金(51478074, 51668040)、博士后科学基金(2016M592908XB)和甘肃省自然科学基金(1610RJZA002)

作者简介: 石岩, 博士, 讲师

收稿日期: 2016-05-10

桥梁排架墩的抗震加固中, BRB 作为可替换的“保险丝”为排架墩体系提供辅助强度和刚度, 地震中由于 BRB 的屈服耗能作用使排架墩本身保持弹性。在国内, 孙利民等^[8-9]提出采用耗能型辅助墩来实现大跨度斜拉桥的地震损伤控制, 对安装 BRB 的辅助墩进行理论分析和试验研究。

双柱式排架桥墩在公路简支梁桥、中小跨径连续梁桥中应用广泛, 汶川地震中强震区(IX ~ XI 烈度) 内的双柱墩则遭受普遍而严重的破坏^[10]。为此, 作者所在课题组^[11-12]对桥梁双柱式排架墩中设置 BRB 的抗震新型构件进行了初步探索。基于性能的抗震设计方法自提出以来, 一直是结构抗震领域的研究热点, 减震(消能)、隔震(桥梁) 结构基于性能的设计方法研究相对较少; Jara 等^[13]给出了 LRB 桥梁的抗震设计思路; Cardone 等^[14]基于 ADRS 谱发展了新建和加固隔震桥梁结构的抗震设计方法。本文在课题组既有的研究基础上, 结合基于性能抗震设计思想主要对设置 BRB 桥梁排架墩的抗震设计参数进行了系统性分析, 亦发展了设置 BRB(或保险丝系统) 的(SDOF) 主体结构弹塑性反应谱模型, 围绕抗震能力与地震需求两个方面, 进而提出了设置 BRB 的桥梁排架墩基于位移的抗震设计方法。

1 设置 BRB 排架墩的设计参数

为了提升桥梁结构的横向抗震能力, 可基于“保险丝”的设计理念在排架墩中设置屈曲约束支撑, 通常 BRB 具有图 1 中的两种布置形式, 即人字撑和单斜撑

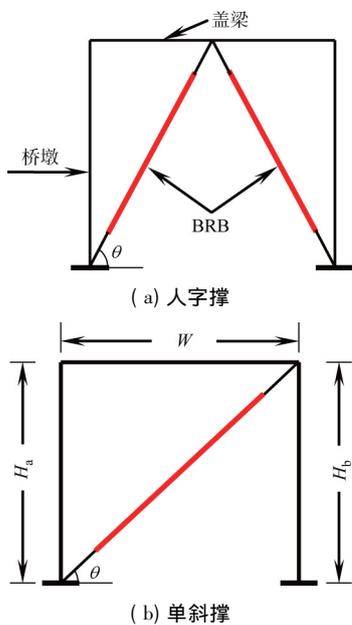


图 1 排架墩 BRB 体系

Fig. 1 Bridge bent with BRB

撑(图中 H_a 和 H_b 分别表示双柱墩的墩高, θ 为 BRB 与地面的水平夹角, W 为排架墩的柱间净距)。

1.1 BRB 的几何和力学参数

屈曲约束支撑沿长度方向主要包括连接段(节点板和过渡段) 和核心段, 参考图 1 所示设置 BRB 的双柱墩, BRB 沿长度方向(轴向) 总变形 Δ_{RT} 为盖梁(或柱脚) 连接节点区变形 Δ_{RZ} 、BRB 连接段(节点板和过渡段) 变形 Δ_{RB} 和核心段(塑性变形区) 变形 Δ_{RC} 之和, 即 $\Delta_{RT} = \Delta_{RZ} + \Delta_{RB} + \Delta_{RC}$ 。通常连接节点区认为刚度很大, 即变形 $\Delta_{RZ} = 0$, 为此定义变形效率比 ψ :

$$\psi = \frac{\Delta_{RC}}{\Delta_{RT}} \quad (1)$$

式中: ψ 可依据设计参数情况取 0.85 ~ 1.0, $\psi = 1.0$ 表示连接段和梁柱节点域为刚性。

如图 1 所示的人字撑和单斜撑体系, 假设其发生微小变形, BRB 与桥墩水平方向的夹角 θ 保持不变; 为简化推导过程中先不计 ψ 的影响。BRB 的初始抗侧刚度为:

$$K_R = \begin{cases} 2E_R A_R \cos^2 \theta / L_{RC} & (\text{人字撑}) \\ E_R A_R \cos^2 \theta / L_{RC} & (\text{单斜撑}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: E_R 、 A_R 、 θ 、 L_{RC} 分别为 BRB 核心变形段钢材的弹性模量、截面等效面积、与地面的水平夹角以及核心段的长度。

BRB 与地面水平夹角 θ 的余弦值为:

$$\cos \theta = \begin{cases} W / 2L_{RT} & (\text{人字撑}) \\ W / L_{RT} & (\text{单斜撑}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: L_{RT} 为 BRB 所在轴线的总长度。

若两侧桥墩墩高一一致($H_a = H_b = H$) 并考虑两墩间距 W 则:

$$L_{RT} = \begin{cases} \sqrt{H^2 + W^2} / 2 & (\text{人字撑}) \\ \sqrt{H^2 + W^2} & (\text{单斜撑}) \end{cases} \quad (4)$$

BRB 设计时通常认为是轴心受力, 则 BRB 的水平屈服强度:

$$F_{Ry} = \begin{cases} 2A_R f_{Ry} \cos \theta & (\text{人字撑}) \\ A_R f_{Ry} \cos \theta & (\text{单斜撑}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: f_{Ry} 为 BRB 核心段钢材的屈服强度。

BRB 的水平屈服位移 x_{Ry} 为:

$$x_{Ry} = f_{Ry} L_{RC} / (E_R \cos \theta) = L_{RC} \varepsilon_{Ry} / \cos \theta \quad (6)$$

式中: ε_{Ry} 为 BRB 核心段钢材的(名义) 屈服应变。

1.2 BRB 核心段长度

从“保险丝”的设计理念出发, 通过在排架墩中设置 BRB, 使 BRB 先于墩柱屈服以消耗地震能量, 并保证桥墩不会发生大的位移, 以达到损伤控制的效果, 同时当桥墩接近达到极限位移时, BRB 不能先于其失

效。这些设计原则可通过能力分析,由 BRB 核心段的长度取值范围决定,分述如下:

(1) 确定 BRB 核心段最大长度

引入参数 φ 为 BRB 核心段长度 L_{RC} 与轴线总长度 L_{RT} 之比,即:

$$L_{RC} = \varphi L_{RT} \quad (7)$$

代入式(6)得:

$$x_{Ry} = \begin{cases} 2\varphi\varepsilon_{Ry}L_{RT}^2/W & (\text{人字撑}) \\ \varphi\varepsilon_{Ry}L_{RT}^2/W & (\text{单斜撑}) \end{cases} \quad (8)$$

考虑规则双柱墩满足 $H_a = H_b = H$ 及假设盖梁为刚性、反弯点位于 $0.5H$ 处,圆形截面桥墩的屈服位移 x_{Fy} :

$$x_{Fy} = 2 \cdot \frac{1}{3} \phi_{Fy} \left(\frac{H}{2}\right)^2 = \frac{1}{6} \phi_{Fy} H^2 \quad (9)$$

式中:桥墩屈服曲率 ϕ_{Fy} 为^[15]:

$$\phi_{Fy} = \xi \varepsilon_{Fy} / D \quad (10)$$

式中: ε_{Fy} 为桥墩纵筋的屈服应变; D 为圆形截面的直径或矩形截面的高度(横向);对于圆形截面, ξ 取 $2.0 \sim 2.5$; 矩形截面, ξ 取 $1.95 \sim 2.4$, 代入得:

$$x_{Fy} = \frac{\xi}{6} \frac{H^2}{D} \varepsilon_{Fy} \quad (11)$$

若要求 BRB 先于排架墩屈服,则 $x_{Ry} < x_{Fy}$ 得:

$$\begin{cases} \frac{2\varphi\varepsilon_{Ry}L_{RT}^2}{W} < \frac{\xi}{6} \frac{H^2}{D} \varepsilon_{Fy} & (\text{人字撑}) \\ \frac{\varphi\varepsilon_{Ry}L_{RT}^2}{W} < \frac{\xi}{6} \frac{H^2}{D} \varepsilon_{Fy} & (\text{单斜撑}) \end{cases} \quad (12)$$

化简并引入近似剪跨比 $\lambda = H/D$ 及墩柱间距与其直径(高度)比 $\gamma = W/D$ 得:

$$\varphi < \begin{cases} \frac{\xi}{3} \frac{\gamma}{4 + \left(\frac{\gamma}{\lambda}\right)^2} \frac{\varepsilon_{Fy}}{\varepsilon_{Ry}} & (\text{人字撑}) \\ \frac{\xi}{6} \frac{\gamma}{1 + \left(\frac{\gamma}{\lambda}\right)^2} \frac{\varepsilon_{Fy}}{\varepsilon_{Ry}} & (\text{单斜撑}) \end{cases} \quad (13)$$

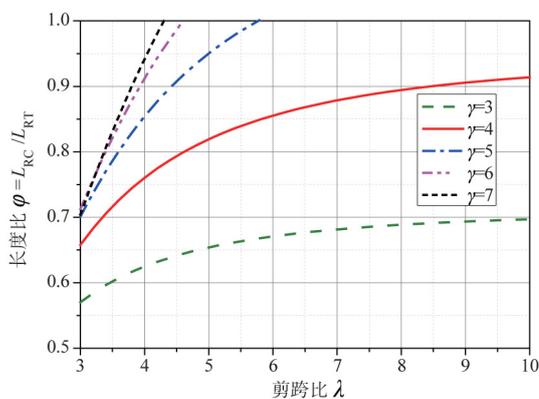
式(13)即为 BRB 核心段的最大长度比,若核心段大于此长度,可能会导致桥墩先于 BRB 屈服的现象发生,因为假定桥墩(水平)屈服位移一定,则 BRB 核心段长度越长, BRB 越不容易屈服。

对于圆形桥墩纵筋为 HRB335, BRB 核心段为 Q235 钢材; ξ 取 2.0 时,人字撑和单斜撑的最大长度比 φ_{max} 与剪跨比 λ 和 γ 的关系,如图 2 所示, φ 一般随着 λ 的增大而增大。

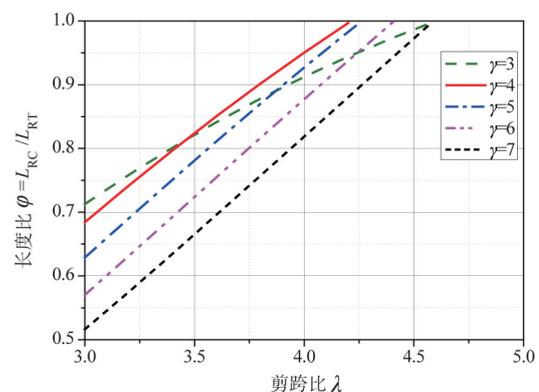
(2) 确定 BRB 核心段最小长度

假设 BRB 核心段的最大设计应变为 ε_{Ru} , 则发生最大设计应变时的桥墩(或 BRB)水平位移为 x_R :

$$x_R = \varepsilon_{Ru} L_{RC} / \cos\theta = \varepsilon_{Ru} \varphi L_{RT} / \cos\theta \quad (14)$$



(a) 人字撑



(b) 单斜撑

图 2 $\lambda-\gamma-\varphi_{max}$ 关系曲线

Fig. 2 $\lambda-\gamma-\varphi_{max}$ relation curve

假设桥墩的侧移角为 δ (水平侧移与桥墩高度之比),要求桥墩达到极限位移时, BRB 核心段的应变小于最大设计应变 ε_{Ru} , 即满足 BRB 后于桥墩退出工作,则有:

$$\varepsilon_{Ru} \varphi L_{RT} / \cos\theta > \delta H \quad (15)$$

将式(3)和式(4)代入上式得:

$$\begin{cases} \frac{2\varepsilon_{Ru}\varphi(H^2 + W^2/4)}{W} > \delta H & (\text{人字撑}) \\ \frac{\varepsilon_{Ru}\varphi(H^2 + W^2)}{W} > \delta H & (\text{单斜撑}) \end{cases} \quad (16)$$

引入相关参数 λ 和 γ 并化简式(16),可得:

$$\varphi > \begin{cases} \frac{2\delta}{\varepsilon_{Ru} \left(4 \frac{\lambda}{\gamma} + \frac{\gamma}{\lambda}\right)} & (\text{人字撑}) \\ \frac{\delta}{\varepsilon_{Ru} \left(\frac{\lambda}{\gamma} + \frac{\gamma}{\lambda}\right)} & (\text{单斜撑}) \end{cases} \quad (17)$$

BRB 核心段的最大设计(名义)应变通常取为 $\varepsilon_{Ru} = 3.0\%$ ^[16-17]。需要说明的是:① BRB 核心段受压时处于“多波弯曲失稳”的变形形态,实际应变与轴心受力有很大的不同,但设计时为简化一般按轴心受力构件计算其“名义应变”或“名义应力”;②文中提出的 BRB

核心段长度确定公式主要引入了无量纲参数,对于规则的多柱式排架墩(所有墩柱等高且墩柱等间距),公式依然适用;当墩柱不等高或者墩柱间距不相等,以及考虑盖梁和基础柔性影响时,尚需进一步探讨;③本设计方法主要针对单个排架墩,若同一座桥中有多个排架墩,可将其离散成多组带排架墩的子结构逐一进行考虑,墩高不同则以矮墩(近似配筋相同)作为控制指标。

假定桥墩的极限侧移角 δ 为 2.0% 和 3.0% 时,人字撑和单斜撑的最小长度比 φ_{\min} 与剪跨比 λ 和 γ 的关系($\lambda-\gamma-\varphi_{\min}$)如图 3 和图 4 所示:对人字撑而言, φ 一般随 λ 和 γ 的增加而降低;对单斜撑这种变化显得平缓,并且在 λ 小于 5~6、 γ 大于 3 时,还有增加趋势。

需要强调的是:上述公式推导中未考虑定变形效率比 ψ 的影响,若考虑则对 BRB 最大长度比 φ_{\max} 应该乘以变形效率比 ψ ,而对于 BRB 最小长度比 φ_{\min} 则应除以 ψ (不考虑也可,偏于安全)。

2 设置 BRB 排架墩的弹塑性反应谱模型

王东升等^[18]发展了无量纲参数的弹塑性反应谱

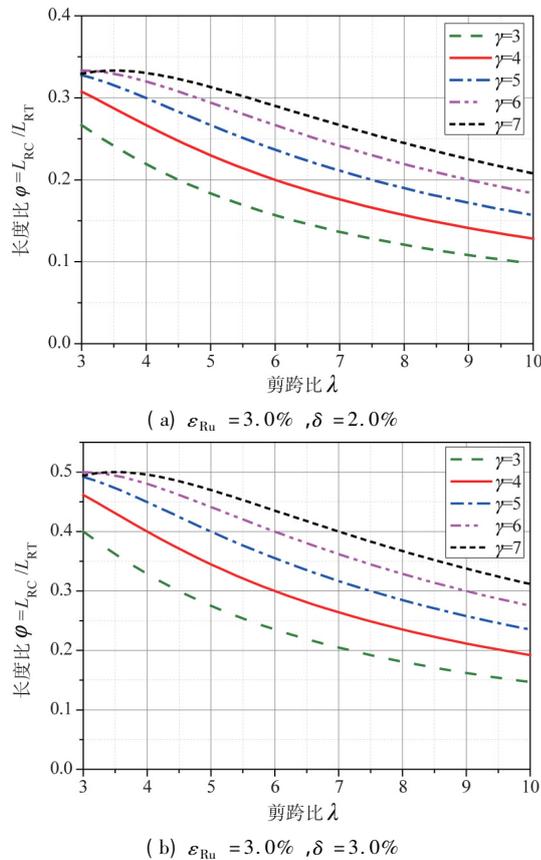


图 3 人字撑 $\lambda-\gamma-\varphi_{\min}$ 关系曲线

Fig. 3 $\lambda-\gamma-\varphi_{\min}$ relation curve of bridge bent with double braces

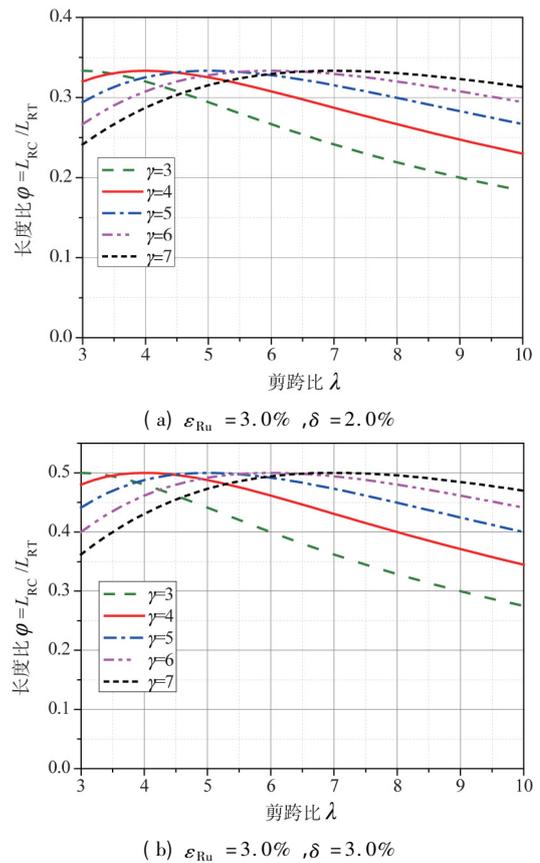


图 4 单斜撑 $\lambda-\gamma-\varphi_{\min}$ 关系曲线

Fig. 4 $\lambda-\gamma-\varphi_{\min}$ relation curve of bridge bent with single brace

的基本方程。注意到,在设置 BRB 的排架墩结构中,桥墩和 BRB 在抗侧力关系上为并联,其具有相同的位移反应参数,而桥梁上部结构(假定规则桥梁)可简化为单个集中质量,故可得到设置 BRB 排架墩(主)结构体系的弹塑性反应谱基本方程:

$$\ddot{\mu}(t) + 2\xi\omega\dot{\mu}(t) + \omega^2 \frac{f_F(t)}{f_{Fy}} + \alpha\beta\omega^2 \frac{f_R(t)}{f_{Ry}} = -\frac{\omega^2 R}{\beta(\omega\xi)} \frac{\ddot{x}_g(t)}{\max(|\ddot{x}_g|)} \quad (18)$$

式中: $\mu(t)$ 为无量纲参数,是主结构的位移反应 $x(t)$ 与屈服位移 x_y 之比(即 $x(t)/x_y$),对 $\mu(t)$ 微分可得到 $\dot{\mu}(t)$ 和 $\ddot{\mu}(t)$; ξ 和 ω 分别为主结构(单独的双柱式排架墩)系统的阻尼比和自振圆频率; $f_F(t)$ 为排架墩提供的恢复力,其对应的屈服力为 f_{Fy} ; $f_R(t)$ 为 BRB 提供的恢复力,其对应的屈服力为 f_{Ry} ; R 为强度折减系数; $\beta(\omega\xi)$ 为主结构(单独的排架墩)体系的放大系数反应谱, $\ddot{x}_g(t)$ 为输入的地震动;另外, α 和 β 分别为 BRB 与桥墩的屈服位移比和刚度比,即:

$$\alpha = \frac{x_{Ry}}{x_{Fy}} \quad (19)$$

$$\beta = \frac{K_R}{K_F} \quad (20)$$

式中: x_{Ry} 为 BRB 的水平屈服位移(与轴向屈服位移不同); x_{Fy} 为不设 BRB 排架桥墩体系的水平屈服位移; K_R 和 K_F 分别为 BRB 和排架墩体系的水平弹性刚度。

需要说明的是,式(18)中的参数及反应参量描述的是主结构(即双柱式排架墩)体系,对于作为“保险丝”的 BRB 构件,则通过无量纲参数项 $\alpha\beta\omega^2 f_r(t) / f_{Ry}$ 来考虑,即 ω 是不设 BRB 的排架墩的自振圆频率,在后面抗震设计方法中的周期与其保持一致。因阻尼(耗能)机制较为复杂,故假设设置 BRB 后体系的阻尼系数 c 保持不变,因阻尼理论本身的假定性,可以接受,公式的具体推导过程详见文献[12]。在给定的地震动记录与 α 和 β 值下,并取特定的强度折减系数 R ,对式(18)进行数值积分可获得其等强度折减系数的延性需求谱(适于加固旧结构);取特定的位移延性系数 μ ,通过搜索算法计算得到其等延性系数的强度折减系数谱(适于设计新结构)。例如,选择文献[12]中的 10 条地震动记录并将 PGA 调整为 0.4g,假设 $\alpha\beta = 0.3$,可计算得到如图 5 和图 6 所示的延性需求谱和强度折减系数谱。

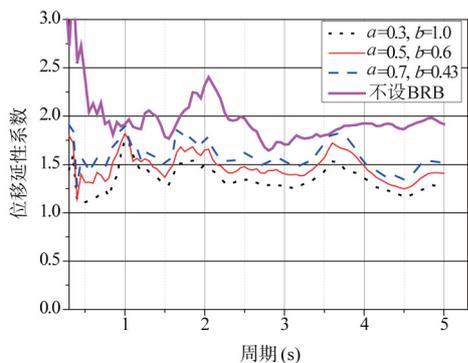


图 5 等强度折减系数 ($R = 2.0$) 的位移延性系数谱
Fig. 5 Displacement ductility factor spectra of constant strength reduction factors ($R = 2.0$)

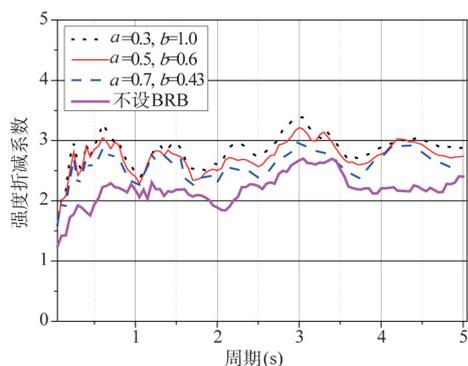


图 6 等位移延性系数 ($\mu = 2.0$) 的强度折减系数谱
Fig. 6 Strength reduction factor spectra of constant displacement ductility factors ($\mu = 2.0$)

从图 5 可以看出:设置 BRB 可明显降低排架墩的位移延性系数,且该位移延性系数在讨论的周期范围内接近于常数;从图 6 可以发现:设置 BRB 可使排架墩的强度折减系数得到明显提高,意味着设置 BRB 后排架墩可以采用更低的设计强度。另外,在设计 BRB 时保持较高的 BRB 屈服力与桥梁排架墩屈服力比值(即 $\alpha\beta$),同时使 BRB 尽早屈服(α 取较小值)将是合适的选择。

3 设置 BRB 排架墩的位移设计方法

假设桥梁双柱式排架墩等高,盖梁刚性,BRB 连接段和梁柱节点域为刚性的情况下,采用式(18)和给定的地震动记录可计算得到设置 BRB 桥梁双柱式排架墩体系的等延性系数的强度折减系数谱,并利用该谱可建立双柱式排架墩基于位移的抗震设计方法。其设计步骤如下:

- (1) 确定桥梁基本参数:初步确定桥墩和盖梁的截面、墩高等几何参数,以及上部结构集中质量 m 。
- (2) 确定设计目标位移:根据式(11)可估计桥墩屈服位移 x_{Fy} ,假设设计目标位移延性系数 μ_d ,不考虑盖梁及基础柔性的贡献,则设计位移为:

$$\Delta_d = \mu_d x_{Fy} \quad (21)$$

- (3) 计算排架墩有效刚度和周期

为考虑桥墩开裂后刚度的减小,采用与轴压比相关的系数 ν 对毛截面刚度进行折减^[19],双柱式排架墩的有效刚度:

$$K_{Fe} = \frac{24\nu E_c I_g}{H^3} \quad (22)$$

式中: E_c 为桥墩混凝土弹性模量; I_g 为桥墩毛截面惯性矩。

- 则双柱式排架墩的有效(弹性)周期 T_{Fe} 为:

$$T_{Fe} = 2\pi \sqrt{m/K_{Fe}} \quad (23)$$

式中: m 为桥梁上部结构、盖梁和桥墩的等效质量。

- (4) 计算排架墩系统的弹性地震反应

给定弹性设计反应谱,通过谱加速度值 $S_a(T_e)$,得到弹性地震力:

$$F_e = m \cdot S_a(T_{Fe}) \quad (24)$$

- (5) 引入等延性系数的强度折减系数谱

假设 BRB 与桥墩的屈服位移比 α 和刚度比 β ,通过迭代算法计算指定地震动记录和延性系数下的强度折减系数谱(式(18))。可采用 Newmark 等^[20]提出的通用公式对强度折减系数谱进行简化拟合,便于设计时取值。

- (6) 排架墩设计地震力和桥墩配筋

根据等延性系数的强度折减系数谱,考虑强度折减系数 R_F 后的设计地震力和设计弯矩为:

$$F_d = F_e / R_F \quad (25)$$

$$M_d = F_d H / 4 \quad (26)$$

式中: F_d 为双柱墩的设计地震力; M_d 为单个墩柱的设计弯矩。

根据以上设计地震力和弯矩来配纵向钢筋,再按塑性铰区最低约束箍筋用量来近似选配箍筋^[21]。然后对桥墩截面进行 $M-\varphi$ 分析,得到其屈服曲率 φ_y 、屈服弯矩 M_y 和(等效)弯曲刚度 $EI = M_y / \varphi_y$ 。

(7) 重新计算排架墩有效周期

重新计算排架墩的有效刚度 K_F' ,对应的有效周期 T_{Fe}' :

$$K_F' = \frac{24EI}{H^3} \quad (27)$$

$$T_{Fe}' = 2\pi\sqrt{m/K_F'} \quad (28)$$

比较式(28)计算的有效周期和和第(3)步采用的有效周期的差异,当二者相差较大时,需采用式(28)计算的有效周期从第(4)步开始重新进行地震力及折减计算,以及截面配筋设计,直到周期满足要求,即:

$$\left| \frac{T_{Fe} - T_{Fe}'}{T_{Fe}} \right| \leq 5\% \quad (29)$$

(8) 确定 BRB 设计参数

由估计或计算的排架墩屈服位移 x_{Fy} 和水平刚度 K_F ,可得到人字撑和单斜撑核心段的长度 L_{RC} 和截面有效面积 A_R 计算公式:

$$L_{RC} = \frac{\alpha x_{Fy} \cos\theta}{\varepsilon_{Ry}} \quad (30)$$

$$A_R = \begin{cases} \frac{\beta K_F L_{RC}}{2E_R \cos^2\theta} & (\text{人字撑}) \\ \frac{\beta K_F L_{RC}}{E_R \cos^2\theta} & (\text{单斜撑}) \end{cases} \quad (31)$$

式中: x_{Fy} 为排架墩屈服位移; E_R 和 ε_{Ry} 分别为 BRB 核心段钢材的弹性模量和(名义)屈服应变。

需要注意的是,采用的核心段长度 L_{RC} 的最大值和最小值应满足式(13)和式(17)的要求,以实现基于“保险丝”的设计理念。若不满足则通过改变屈服位移比 α 和刚度比 β ,从第(5)步重新实现。

图 7 给出了相应的设计流程图。

4 设计算例

下面介绍一个双柱式排架墩设置 BRB 的设计实例:

(1) 桥墩高度为 9m,圆形截面直径 1.5m,混凝土

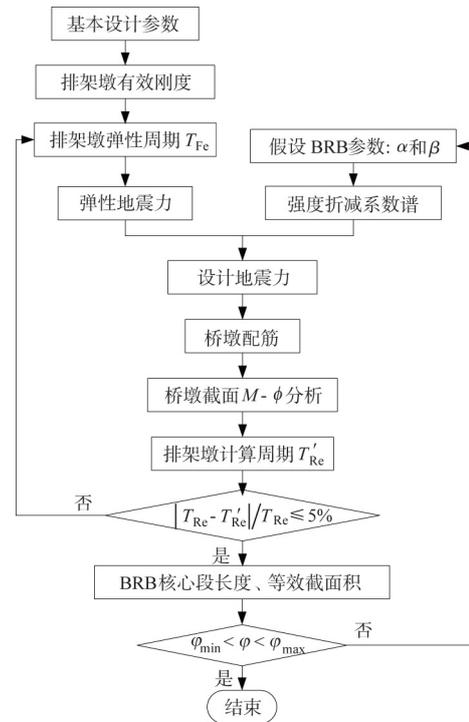


图 7 设置 BRB 双柱式排架墩的位移设计流程
Fig. 7 Flowchart of bridge bent with BRB based on displacement design

C30; 盖梁为 1.9m × 2.0m 的矩形截面,桥墩在盖梁处的净间距为 6.5m; 桥墩和盖梁都采用 HRB335 钢筋,上部结构质量为 703t。计算得到: $\lambda = 6.0$, $\gamma = 4.3$, $\varphi_{max} = 0.91$, $\varphi_{min} = 0.21$ 。

(2) 假设目标位移延性系数 $\mu_d = 2$, 桥墩屈服位移 $x_{Fy} = 0.03m$, 则设计位移 $\Delta_d = 0.06m$ 。

(3) 根据轴压比,桥墩开裂后的有效刚度折减系数取 0.5, 排架墩的有效刚度 $K_{Fe} = 1.23 \times 10^5 kN/m$, 双柱式排架墩的有效(弹性)周期 $T_{Fe} = 0.48s$ 。

(4) 选择文献[12]中的 10 条地震动记录并将 PGA 调整为 0.4g, 得到平均反应谱作为弹性设计谱, 对有效周期的反应谱值为 $S_a(T_{Fe}) = 8.0m/s^2$, 弹性地震力 $F_e = 5660kN$ 。

(5) 设 BRB 与桥墩的屈服位移比 $\alpha = 0.5$ 和刚度比 $\beta = 0.6$ 采用选择的地震动记录通过迭代算法得到延性系数 $\mu_d = 2$ 时的强度折减系数谱, 并采用 Newmark 等^[20]提出的通用公式对强度折减系数谱进行简化拟合, 如图 8 所示; 有效周期 $T_{Fe} = 0.48s$ 对应的强度折减系数 $R_F = 2.7$ 。

(6) 考虑强度折减系数 R_F 后的设计地震力 $F_d = 2176kN$, 设计弯矩 $M_d = 4895kN \cdot m$, 依此配 28 根 $\Phi 28$ 纵向钢筋, 箍筋为直径 12mm 的 HPB235 螺旋状光圆钢筋, 间距为 100mm。通过 $M-\varphi$ 分析并计算得到排架墩的有效刚度 $K_F' = 1.09 \times 10^5 kN/m$, 对应的有效周

期 $T_{Fe} = 0.51s$ 满足要求。本设计算例的示意图如图 9 所示。

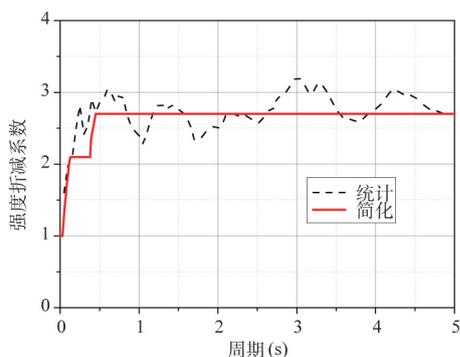


图 8 统计和简化的强度折减系数谱($\mu = 2.0$)

Fig. 8 Statistical and simplified strength reduction factor spectra ($\mu = 2.0$)

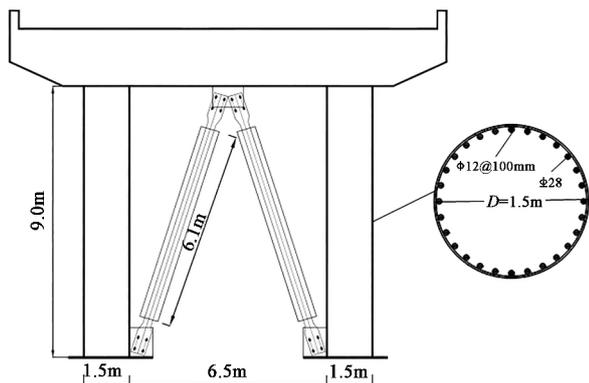


图 9 设计算例示意图

Fig. 9 Design drawing of a bridge bent

(7) 人字形 BRB 核心段的长度 $L_{RC} = 6.1m$, 截面有效面积 $A_{Re} = 6.17 \times 10^{-3} m^2$, BRB 长度比 $\varphi = 0.64$, 满足要求。BRB 设计参数可以在目前的商业化产品中找到。最后, 利用非线性时程分析方法验证了设计方法的有效性。基于 OpenSees 地震分析平台建立动力分析模型, 上部结构采用集中质量的方法模拟, 桥墩和盖梁采用基于纤维截面的非线性梁柱单元模拟, BRB 采用 steel02 材料的桁架单元模拟。通过输入对应的 10 条地震动记录, 设置 BRB 排架墩体系的位移峰值平均值为 $0.045m$, 与设计目标位移 ($0.06m$) 相差约 25%, 基本在工程可接受范围之内。

5 结论

本文基于保险丝的抗震设计理念, 提出了在桥梁排架墩中通过设置 BRB 来提升其抗震能力的构想。从保证 BRB 先于排架墩屈服和后于桥墩失效(即 BRB 满足最大设计应变)角度, 推导出了与桥墩几何参数

相关的 BRB 核心段长度范围表达式, 包括桥墩剪跨比、墩柱间距与直径(高度)比等影响参数; 发展了设置保险丝(BRB)的 SDOF 主结构体系弹塑性反应谱模型, 依此统计得到设置 BRB 排架墩体系等延性系数的强度折减系数谱和等强度折减系数的位移延性需求谱, 以求解体系的地震需求; 最后给出了设置 BRB 的桥梁排架墩基于位移的抗震设计方法, 并结合一个具体桥梁排架墩实例说明了建议设计方法的可行性。

参 考 文 献

- [1] Fahnstock L A, Sause R, Ricles J M. Seismic response and performance of buckling-restrained braced frames [J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133 (9): 1195-1204
- [2] 吴徽, 张国伟, 赵健, 等. 防屈曲支撑加固既有 RC 框架结构抗震性能研究 [J]. 土木工程学报, 2013, 46(7): 37-46 (Wu Hui, Zhang Guowei, Zhao Jian, et al. Seismic performance of existing RC frame structures reinforced with buckling-restrained braces [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(7): 37-46 (in Chinese))
- [3] Usami T, Lu Z, Ge H. A seismic upgrading method for steel arch bridges using buckling-restrained braces [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2005, 34 (4/5): 471-496
- [4] Carden L P, Itani A M, Buckle I G. Seismic performance of steel girder bridges with ductile cross frames using buckling-restrained braces [J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(3): 338-345
- [5] Celik O C, Bruneau M. Seismic behavior of bidirectional-resistant ductile end diaphragms with buckling restrained braces in straight steel bridges [J]. Engineering Structures, 2009, 31(2): 380-393
- [6] Lanning J, Benzoni G, Uang C M. Using buckling-restrained braces on long-span bridges. I: Full-scale testing and design implications [J]. Journal of Bridge Engineering, 2016: 04016001
- [7] El-Bahey S, Bruneau M. Buckling restrained braces as structural fuses for the seismic retrofit of reinforced concrete bridge bents [J]. Engineering Structures, 2011, 33(3): 1052-1061
- [8] 谢文, 孙利民, 魏俊. 附有结构“保险丝”构件的桥墩抗震性能试验研究及其应用 [J]. 中国公路学报, 2014, 27(3): 59-70 (Xie Wen, Sun Limin, Wei Jun. Experimental study on seismic performance of bridge piers with structural fuses and its application [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(3): 59-70 (in Chinese))
- [9] 孙利民, 魏俊, 刘建新, 等. 耗能型辅助墩抗震性能数值研究 [J]. 工程力学, 2014, 31(12): 57-67 (Sun Limin, Wei Jun, Liu Jianxin, et al. Numerical investigation of seismic performance of energy dissipation subsidiary piers [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(12): 57-67 (in Chinese))
- [10] 陈乐生, 庄卫林, 赵河清, 等. 汶川地震公路震害调查: 桥梁 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2012

(下转第 128 页)

度对温度效应及车辙变形的影响[J]. 中国公路学报, 2012 25(1): 21-28(Li Sheng, Liu Zhaohui, Li Yuzhi. Influence of structure layer thickness of CRC + AC

composite pavement on temperature effect and rutting deformation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012 25(1): 21-28(in Chinese))

- 李 盛(1980-) 男, 博士, 副教授。主要从事路面结构与材料研究。
- 杨 帆(1993-) 男, 硕士研究生。主要从事路面结构设计研究。
- 曹 前(1991-) 男, 硕士研究生。主要从事路面结构与新材料研究。
- 刘朝晖(1968-) 男, 博士, 教授。主要从事路面结构与材料研究。

(上接第 68 页)

[11] 孙治国, 华承俊, 石岩, 等. 利用 BRB 实现桥梁排架基于保险丝理念的抗震设计[J]. 振动与冲击, 2015, 34(22): 199-205(Sun Zhiguo, Hua Chengjun, Shi Yan, et al. Seismic design of bridge bents with BRB as structural fuse[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(22): 199-205(in Chinese))

[12] 石岩. 减隔震桥梁性能设计方法及环境影响因素研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2015(Shi Yan. Performance-based design method and effect of environmental condition on earthquake response for seismically isolated bridges[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2015(in Chinese))

[13] Jara M, Casas J R. A direct displacement-based method for the seismic design of bridges on bi-linear isolation devices [J]. Engineering Structures, 2006, 28(6): 869-879

[14] Cardone D, Dolce M, Palermo G. Direct displacement-based design of seismically isolated bridges[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2009, 7(2): 391-410

[15] Priestley M J N, Seible F, Calvi G M. Seismic design and retrofit of bridges [M]. New York: John Wiley & Sons, 1996

[16] Iwata M, Murai M. Buckling-restrained brace using steel mortar planks: performance evaluation as a hysteretic damper[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2006, 35(14): 1807-1826

[17] 马宁, 吴斌, 欧进萍. 全钢防屈曲支撑局部稳定性设计[J]. 工程力学, 2012, 30(1): 134-139(Ma Ning, Wu Bin, Ou Jinping. Local buckling design of all-steel buckling restrained brace [J]. Engineering Mechanics, 2012, 30(1): 134-139(in Chinese))

[18] 王东升, 李宏男, 王国新. 统计意义一致的弹塑性设计位移谱[J]. 大连理工大学学报, 2006, 46(1): 87-92(Wang Dongsheng, Li Hongnan, Wang Guoxin, et al. Research on inelastic response spectra for bi-directional ground motions [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2006, 46(01): 87-92(in Chinese))

[19] Elwood K J, Eberhard M O. Effective stiffness of reinforced concrete columns[J]. ACI Structural Journal, 2009, 106(4): 476-484

[20] Newmark N M, Hall W J. Earthquake spectra and design [R]. Berkeley, California, 1982

[21] 孙治国, 王东升, 杜修力, 等. 钢筋混凝土桥墩塑性铰区约束箍筋用量研究[J]. 中国公路学报, 2010, 23(3): 48-57(Sun Zhiguo, Wang Dongsheng, Du Xiuli, et al. Research on amount of confining reinforcement in potential plastic hinge regions of RC bridge columns [J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(3): 48-57(in Chinese))

- 石 岩(1985-) 男, 博士, 讲师。主要从事桥梁抗震研究。
- 王东升(1974-) 男, 博士, 教授。主要从事桥梁抗震研究。
- 韩建平(1970-) 男, 博士, 教授。主要从事工程结构抗震、健康监测及损伤诊断研究。