

# 基于 SMA 特性的可更换 BRB 设计方法研究

阎石,潘秋宇,苏醒

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要目的** 利用形状记忆合金(SMA)的超弹性和新型约束部件组装形式,提出一种基于 SMA 的新型 BRB 构件,以解决传统屈曲约束支撑(BRB)可恢复功能差和不可更换的问题。**方法** 利用特征值理论研究新型 BRB 构件整体稳定性,并设计约束部件,并且利用提出的设计方法进行了一榀多层平面钢框架的算例分析。**结果** 在目标层间位移角  $\alpha \geq 1/50$ 、构件与框架刚度比  $\beta = 1$  的条件下,提出的设计方法在构件层面可以指导基于 SMA 的新型 BRB 构件设计,且构件的各项性能可以满足强度要求。**结论** 可以利用基于刚度比的设计方法对新型 BRB 构件的核心部件进行设计,并完成对新型 BRB 约束部件强度的校核。

**关键词** 形状记忆合金(SMA);可恢复功能;屈曲约束支撑(BRB);超弹性;设计方法

中图分类号 TU352;TU318;TG139<sup>+</sup>.6

文献标志码 A

## Design Method of SMA Property-based Replaceable BRBs

YAN Shi, PAN Qiuyu, SU Xing

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** A new type of buckling restrained brace (BRB) component based on shape memory alloys (SMAs) is proposed. The novel BRB utilizes the hyper elasticity of SMA and a new assembly of restraint parts to solve the problem of poor restorability and non-replacement of traditional BRBs. The entire stability of the new type BRB component using eigenvalue theory is researched, the constraint components is designed. Finally, the proposed design method based on stiffness ratio can be used to analyze a calculation example of a multi-layer plane steel frame. The proposed design method can guide the design of new SMA-based BRB components. The performance of the components can meet the strength requirements under the conditions of target displacement angle  $\alpha \geq 1/50$ , member and frame stiffness ratio  $\beta = 1$ . The results show that the proposed method can be applied to design the SMA-based resilient and replaceable BRB components, and the effectiveness of the design method is proved by the example.

**Key words:** shape memory alloys (SMA); resilience; buckling restrained braces (BRBs); hyper

elasticity; design method

国外学者于 20 世纪 70 年代提出了屈曲约束支撑(BRB),可以保证结构承受水平荷载作用时,在全截面屈服前不发生屈曲,极大地改善了框架结构抵抗水平地震作用的能力。然而,传统 BRB 依然没有摆脱依靠提高结构刚度来增强结构抗震能力的缺点,强震后残余变形依然较大,影响结构的维修与继续使用。因此,韧性、可更换且高效耗能等性能成为新型 BRB 研发的重点,且目前已经取得一定的研究成果。

结构抗震韧性是指结构震后不需修复或快速修复即可恢复功能的性能。C. Christopoulos 等<sup>[1]</sup>于 2008 年提出了一种由内钢管、外钢管、摩擦阻尼耗能装置、端板和预应力筋构成的自复位耗能支撑。研究表明,该支撑具有良好的自复位能力。D. J. Miller 等<sup>[2]</sup>于 2011 年提出了一种用预张拉的 SMA 作为自复位部件的自复位 BRB,其构成组件为耗能内芯、三重钢管以及预张拉的 SMA,利用 SMA 超弹性提供构件的自复位能力。徐龙河<sup>[3]</sup>于 2016 年提出了一种利用预压碟簧提供自复位能力,并设有摩擦耗能装置的自复位耗能支撑。试验表明,该支撑具有良好的自复位能力与耗能能力。虽然具有自复位能力的支撑的研究越来越多,但是很多支撑依然存在耗能部件检测更换难度大的问题。基于此,笔者提出一种基于超弹性 SMA 的韧性且可更换新型 BRB,并提出了具体的设计指标与设计方法。使用超弹性 SMA 角钢作为新型 BRB 核心部件来提供更大的恢复力和滞回耗能能力,并且利用核心部件可更换的形式,提高结构韧性性能。

## 1 新型 BRB 构造和工作原理

新型基于 SMA 特性的可更换 BRB(简称新型 BRB)形式与组装方式分别如图 1 和图 2 所示。新型 BRB 由内约束活塞、内约束

套筒、SMA 角钢、外约束部件、高强弹簧和高强螺栓组成。两段内约束套筒套在内约束活塞上,中间用高强弹簧连接,组成了可伸缩的内约束部件,4 根 SMA 角钢以螺栓连接的方式固定在内约束套筒上,两个 U 形外约束部件以螺栓连接的方式固定在 SMA 角钢外侧。

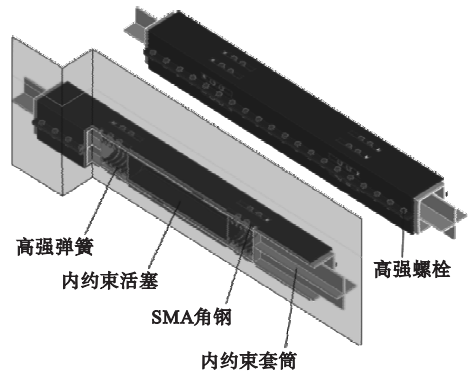


图 1 新型 BRB 构件形式与组成

Fig. 1 The shape and components of new BRB member

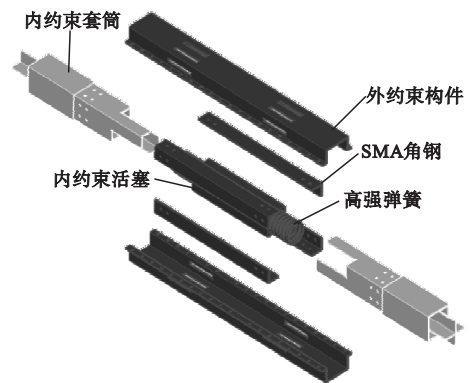


图 2 新型 BRB 构件组装方式

Fig. 2 The assemble of new BRB components

新型 BRB 的两段内约束套筒可以相对运动,将所受轴向力通过内约束套筒传递到 SMA 角钢与高强弹簧上,由 SMA 角钢提供滞回耗能能力,由弹簧和 SMA 角钢共同提供自复位能力。外约束部件不承受轴向力作用,仅约束核心段不发生屈曲。

由于对 SMA 三维本构模型的试验研究

较少,所以笔者根据董金芝<sup>[4]</sup>的 SMA 棒材试验数据简化得到的 SMA 本构模型(见图3)对新型 BRB 构件进行设计。设计目标是保证发生小震时,核心部件保持弹性状态,为框架体系提供抗侧刚度;发生中大震时,新型 BRB 中的 SMA 角钢受应力影响进入马氏体相变阶段并开始滞回耗能,震后可以通过拆开 BRB 外约束部件检测核心耗能角钢是否发生损坏。若核心耗能角钢发生损坏,可以通过更换的方式使其恢复使用功能。

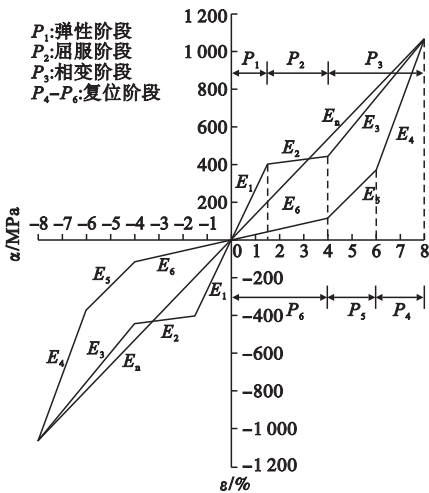


图3 SMA 材料简化本构模型示意图

Fig. 3 The schematic of simplified SMA constitutive models

## 2 基于位移的核心耗能区段设计方法

我国《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)<sup>[5]</sup>(以下简称《规范》)采用“两阶段,三水准”的抗震设计思想。“两阶段”设计思想中,并未给出中震下的相应限值,但根据罗文斌<sup>[6]</sup>、蔡健<sup>[7]</sup>等人的研究,结构在《规范》“中震”作用下的弹塑性位移近似等于按弹性假设计算的位移。钢框架结构相较于混凝土框架结构具有更高的韧性和更大的层间位移角限值。笔者仅针对钢框架结构设计新型 BRB。

### 2.1 设计流程

新型 BRB 构件设计流程如下:

(1)在已知钢框架材料与几何条件下,按照荷载规范确定外荷载,计算钢框架弹性、弹塑性和最大层间位移角限值。

(2)根据最大层间位移角限值和核心段目标应变试算核心耗能部件长度。

(3)校核新型 BRB 框架在多遇地震作用下位移是否满足最大弹性层间位移角要求,并校核弹塑性阶段所对应核心耗能部件应变是否达到耗能需求。若不满足要求,重新选择核心部件目标应变。

(4)初选名义抗侧刚度比,估算新型 BRB 构件核心段等效截面积,并进行 SMA 角钢与高强弹簧的刚度分配,完成核心段设计。

(5)进行新型 BRB 内外约束的设计和 高强螺栓连接设计,完成屈曲约束支撑的设计。

### 2.2 框架水平位移限值与 BRB 目标应变

BRB 的目标应变与对应的框架水平位移限值有关。由于 BRB 为框架抗侧向力构件,力学性能与框架侧向位移密切相关。所以,确定框架水平位移对新型 BRB 设计至关重要。

根据《规范》规定,对于多、高层钢结构,在多遇地震和罕遇地震作用下,楼层内最大层间位移角限值分别为 1/250 和 1/50。根据文献[8],BRB 框架用于应对 2.0 倍设计层间位移的变形,所以在构件设计时,可以考虑极限设计层间位移角为 1/25。

对于新型 BRB 构件设计需满足:当层间位移角达到 1/250 时,核心耗能部件处于弹性阶段,层间位移角达到弹塑性位移角限值前,核心耗能部件进入滞回耗能状态;当层间位移角达到 1/30 时,核心耗能部件达到目标应变。

### 2.3 新型 BRB 参数与核心耗能部件长度

笔者以单斜布置 BRB 为例,布置简图如图 4 所示,计算简图如图 5 所示。

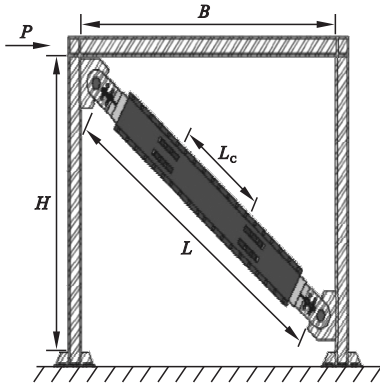


图4 新型 BRB 布置简图

Fig. 4 The schematic of new type BRB layout

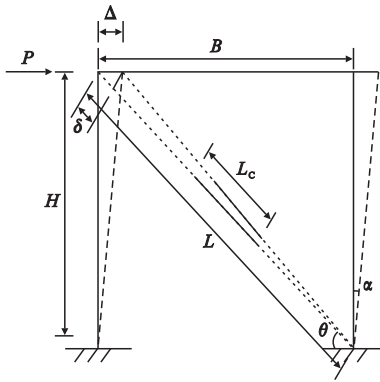


图5 新型 BRB 计算简图

Fig. 5 The schematic of new type BRB calculation

根据框架跨度  $B$ 、高度  $H$  和层间位移角  $\alpha$  与框架的几何关系可以求出 BRB 轴向位移如下:

$$\delta = \Delta \cos \theta = H \alpha \cos \theta. \quad (1)$$

式中:  $\delta$  为 BRB 轴向变形;  $\Delta$  为框架侧向位移;  $\theta$  为 BRB 与框架水平夹角。

忽略非耗能段的轴向变形, 假设新型 BRB 的轴向变形集中于核心耗能段, 确定核心耗能部件的目标应变, 即可求得为满足新型 BRB 构件的位移及耗能要求, 估算核心耗能角钢有效长度  $L_c$ :

$$L_c = \frac{H \alpha \cos \theta}{\varepsilon_b}. \quad (2)$$

式中:  $\varepsilon_b$  为核心耗能部件有效长度应变。

当校验核心耗能段长度需要保证  $\alpha = 1/250$  时:

$$\varepsilon_b = \frac{H \alpha \cos \theta}{L_c} \leq 0.02. \quad (3)$$

当校验核心耗能段长度需要保证  $\alpha = 1/50$  时:

$$\varepsilon_b = \frac{H \alpha \cos \theta}{L_c} \geq 0.04. \quad (4)$$

## 2.4 基于刚度比设计新型 BRB 核心段

BRB 核心段除了满足耗能对应变的需求外, 所提供的侧向刚度也应当满足框架刚度需求<sup>[9]</sup>。新型 BRB 等效侧移刚度与框架层间侧移刚度比简称刚度比, 根据刚度比需求, 可以确定新型 BRB 核心段截面形式和面积。

以单层单跨框架为例, 首先按反弯点法计算框架的抗侧刚度  $D$ :

$$D = \sum \frac{12(EI)_c}{H^3}. \quad (5)$$

式中:  $(EI)_c$  为框架柱抗弯刚度。

引入如下中间变量参数:

(1) 变形集中因子  $\rho$ 。表示 BRB 轴向应变的集中程度, 如图 5 所示。

$$\rho = \frac{L_c}{L}. \quad (6)$$

(2) 核心段等效截面积  $A'_c$ 。表示将内置弹簧提供的轴向反力全部等效为由耗能角钢提供, 通过刚度比完成等效截面积计算之后, 再根据实际需求, 对耗能角钢与高强弹簧的刚度贡献进行分配。

(3) BRB 名义弹性模量  $E_{nB}$  和名义应变  $\varepsilon_n$ 。将新型 BRB 的轴向刚度线性化, 以进行截面尺寸计算。

$$E_{nB} = E_n \left( \frac{1 + \gamma}{\gamma} \right). \quad (7)$$

式中:  $\gamma$  为 SMA 角钢与高强弹簧的刚度比;  $E_n$  为 SMA 角钢名义弹性模量。

单斜布置 BRB 构件对框架提供的抗侧刚度  $k_b$  的表达式为

$$k_b = \frac{E_{nB} A'_c \sin \theta \cos^2 \theta}{\rho H}. \quad (8)$$

确定了 BRB 与框架柱的抗侧刚度比  $\beta = k_b/D$ , 就可以确定新型 BRB 核心耗能段的等效截面积  $A'_c$ 。赵瑛等<sup>[10]</sup>提出 BRB 框架抗

侧刚度比合理取值范围为  $0.5 \leq \beta \leq 2$ , 则核心段等效截面面积  $A'_c$  为

$$A'_c = \frac{\beta D \rho H}{E_{nB} \sin \theta \cos^2 \theta} \quad (9)$$

弹簧力学模型如图 6 所示。定义  $u_{s,\max}$  为弹簧的最大位移行程,  $f_{s,\max}$  为达到最大位移行程时所对应的恢复力。核心耗能角钢与弹簧变形相等, 为刚度并联形式。SMA 耗能角钢提供一定的恢复力, 又提供滞回耗能能力。SMA 的力学模型可以简化为六段刚度模型, 模型如图 3 所示。

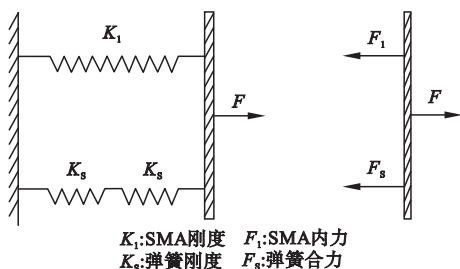


图 6 新型 BRB 计算模型示意图

Fig. 6 The schematic of new type BRB calculation model

于是得到:

$$\begin{cases} F = F_1 + F_s, \\ k_{sc} = 0.5k_s, \\ \Delta = \frac{F_1}{k_1} = \frac{F_s}{k_{sc}}. \end{cases} \quad (10)$$

$$\gamma = \frac{k_1}{2k_{sc}} = \frac{F_1}{F_s} \quad (11)$$

SMA 角钢截面积与核心段等效截面积关系为

$$A_c = \frac{\gamma}{1 + \gamma} A'_c \quad (12)$$

根据型钢表可查到核心角钢部件的截面  $b_s$  和  $d_s$ 。

### 3 约束部件及高强螺栓设计方法

#### 3.1 约束部件核心段尺寸设计

根据已经确定的核心段角钢截面参数, 进行约束部件设计, 如图 7 所示。

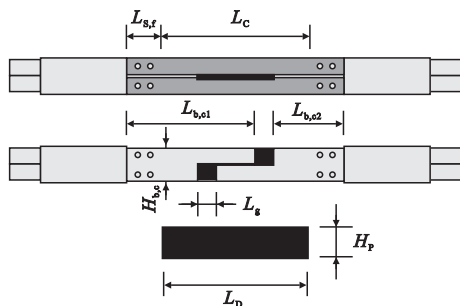


图 7 约束部件尺寸计算简图

Fig. 7 The schematic for calculation of restrained component dimensions

图 7 中  $L_{s,f}$  为 SMA 耗能角钢固定端长度,  $L_{b,c1}$  和  $L_{b,c2}$  分别为内约束套筒核心段长段和短段长度,  $H_{b,c}$  为内约束套筒高度,  $L_g$  为内约束套筒初始间隙,  $L_p$  和  $H_p$  分别为内约束活塞长度和高度。内约束部件厚度均为  $d_b$ , 间隙为  $v_0$ 。以上物理量取值如下:

$$L_{s,f} = 0.25L_c \quad (13)$$

$$L_g = 1.2\delta \quad (14)$$

$$L_{b,c1} = 0.5L_c + L_{s,f} + L_g \quad (15)$$

$$L_{b,c2} = 0.5L_c + L_{s,f} - 2L_g \quad (16)$$

$$L_p = L_c \quad (17)$$

$$H_{b,c} = \max[3b_s, 150 \text{ mm}] \quad (18)$$

$$H_p = H_{b,c} - d_b - v_0 \quad (19)$$

#### 3.2 新型 BRB 构件抗弯刚度划分

将新型 BRB 的内约束部件划分为三段, 中间段为核心耗能段, 两边为非核心段, 其中核心耗能段可以采用如下方法计算整体稳定性。为了保守计算, 内约束套筒交错部分不考虑其抗弯刚度, 只考虑保证变形协调。所以核心耗能段还需划分为三个部分, 即中间部分“内约束套筒交错段”和两端的“无内约束活塞段”。

假设内约束活塞、内约束套筒、SMA 角钢、外约束部件抗弯刚度分别为  $E_p I_p$ 、 $E_b I_b$ 、 $E_s I_s$  和  $E_w I_w$ , 构件临界荷载计算公式为

$$\begin{cases} P_{cr,g1} = \frac{\pi^2 (E_p I_p + E_s I_s + E_w I_w)}{(\mu \cdot L_c)^2}; \\ P_{cr,g2} = \frac{\pi^2 (E_b I_b + E_s I_s + E_w I_w)}{(\mu \cdot L_c)^2}. \end{cases} \quad (20)$$

式中:  $P_{cr,g1}$  为有内约束活塞但内约束套筒不提供刚度的部分放大到核心段全长上的临界屈曲荷载;  $P_{cr,g2}$  为无内约束活塞但外约束套筒提供抗弯刚度的部分放大到核心段全长上的临界屈曲荷载。

### 3.3 外约束部件尺寸设计

外约束部件尺寸需满足轴向位移要求, 并且与内约束部件间隙不能过大, 以免影响稳定性, 外约束部件设计如图 8 所示。

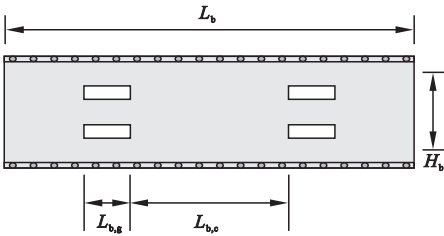


图 8 外约束部件形状及设计参数示意图

Fig. 8 The schematic of external restrained component shape and design parameters

图 8 中物理量取值方法如下:

$$L_b = 0.8L_c \quad (21)$$

$$L_{b,c} = L_c - L_g \quad (22)$$

$$L_{b,g} = L_{s,f} + L_g \quad (23)$$

$$H_b = H_{b,c} + d_{b,c} + v_0 \quad (24)$$

式中:  $d_{b,c}$  为内约束套筒核心段厚度;  $v_0$  为内外约束部件间隙。

### 3.4 约束部件强度校核

对于新型 BRB 构件, 由于构造相对复杂, 在强度校核时仅考虑最不利因素, 即核心段 SMA 角钢发生一阶屈曲, 与约束部件发生三点接触<sup>[11]</sup>。

核心段约束部件抗弯刚度为  $(E_p I_p + E_w I_w)$ , 为简化计算, 引入核心段稳定系数  $\zeta$ <sup>[12]</sup>, 可将内核全截面屈服条件简写为

$$\zeta = \frac{\pi^2 (E_p I_p + E_w I_w) / L_c^2}{F_y} \geq 1 \quad (25)$$

式中:  $F_y$  为核心段约束部件屈服荷载。

由于考虑到核心段刚度远小于约束刚度, 式(25)忽略了核心部件对整体稳定性的贡献, 于是将核心耗能部件进入屈服前 BRB

构件不发生整体失稳作为内核全界面屈服的条件。

为设置初始缺陷, 假定 BRB 构件核心部件在加载前存在初始弯曲变形:

$$y_0 = v_0 \sin(\pi x / L_c) \quad (26)$$

式中:  $v_0$  为核心部件中心处初挠度值;  $x$  为计算位置坐标。

考虑加载初偏心  $e_0$ , 经过推导可得约束部件承受弯矩  $M_{C,cr}$  为

$$M_{C,cr} = \frac{f_y A_c (y_0 + e_0)}{1 - \frac{f_y A_c L_c^2}{\pi^2 (E_p I_p + E_w I_w)}} \quad (27)$$

式中:  $f_y$  为目标轴应变下 SMA 应力。

显然, 新型 BRB 构件要求在 SMA 角钢全截面屈服前, 约束部件中心处弯矩不能超过其抗弯能力  $M_{C,max}^R$ , 即:

$$M_{C,cr} \leq M_{C,max}^R \quad (28)$$

将式无量纲化处理, 可得:

$$\frac{M_{C,max}^R}{f_y A_c L_c} \left( 1 - \frac{1}{\zeta} \right) \leq \frac{y_0 + e_0}{L_c} \quad (29)$$

### 3.5 高强螺栓连接设计

#### 3.5.1 SMA 角钢螺栓连接设计

SMA 角钢与内约束套筒连接的位置是新型 BRB 构件最重要的连接位置, 需要优先考虑。周云<sup>[13]</sup>提出可以通过削弱核心单元耗能区来实现“定点屈服”的理念。同时李幅昌等<sup>[14]</sup>研究了核心单元开孔对支撑构件性能的影响。基于以上研究, 笔者提出的新型 BRB 构件 SMA 核心耗能角钢截面选择如图 9 所示。

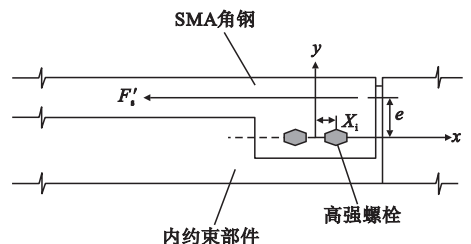


图 9 SMA 角钢部件螺栓连接计算简图

Fig. 9 The schematic for bolt connection of angle SMA component

螺栓承载力需要满足下式:

$$\sqrt{\left(\frac{F'_s}{n}\right)^2 + \left(\frac{F'_s e x_1}{\sum x_i^2}\right)^2} < 0.9 n_f \mu N. \quad (30)$$

式中: $F'_s$ 为单根 SMA 角钢所受轴向力设计值; $n$ 为受力螺栓数; $x_1$ 为  $x$  轴最外侧螺栓到  $x$  轴中轴线距离; $x_i$ 为第  $i$  颗螺栓到  $x$  轴中性轴的距离; $n_f$ 为传力摩擦面数; $\mu$ 为抗滑移系数; $N$ 为螺栓予拉力设计值<sup>[15]</sup>。

### 3.5.2 高强弹簧连接设计

BRB 构件内置高强弹簧连接受力如图 10 所示。高强弹簧的轴力由 4 颗高强螺栓共同提供,螺栓强度需满足如下条件:

$$F_b = \frac{F_s}{n} = \frac{f_y A_c}{2\gamma n} \leq 0.8 N. \quad (31)$$

式中: $n$ 为弹簧连接螺栓数。

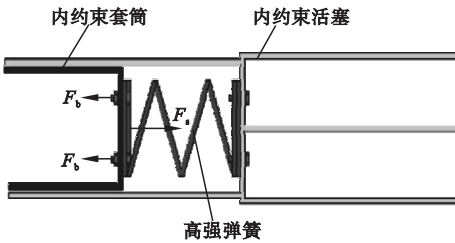


图 10 内置高强弹簧与高强螺栓连接受力简图

Fig. 10 The mechanical schematic for connection of internally placed spring and high-strength bolts

### 3.5.3 外约束部件螺栓连接设计

外约束部件主要承受核心部件屈曲时所产生的弯矩作用,所以需要对螺栓连接强度进行设计。计算简图如图 11 所示。

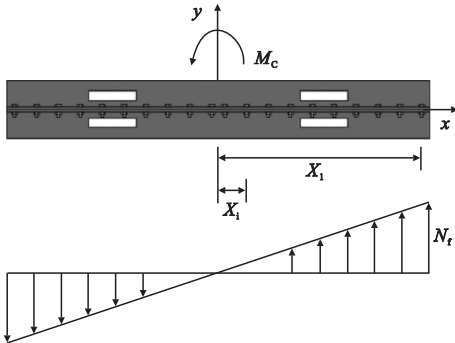


图 11 外约束部件螺栓连接受力简图

Fig. 11 The mechanical schematic of externally restrained components and high-strength bolts  
螺栓连接强度需要满足下式:

$$N_{fl} = \frac{M_c x_1}{m \sum x_i^2} \leq 0.8 N. \quad (32)$$

$$M_c = \frac{E_w I_w M_{c,cr}}{E_p I_p + E_w I_w}. \quad (33)$$

式中: $M_c$ 为外约束部件所受弯矩设计值; $x_1$ 为校核螺栓与中性轴距离; $x_i$ 为第  $i$  颗螺栓距中性轴距离; $m$ 为同一截面螺栓个数。

## 4 算例分析

### 4.1 钢框架结构选取

新型可恢复功能 BRB 可以满足较大的轴向位移,初选一个在地震作用下,薄弱层层间位移角较大的柔性钢框架结构进行新型 BRB 构件的设计。在 PKPM 软件中建立一个 10 层钢框架结构,平面布置如图 12 所示,分析方向为  $Y$  方向,不考虑扭转作用。

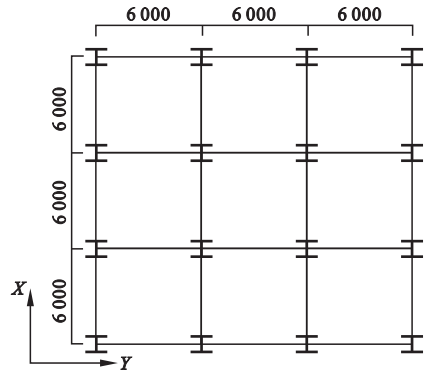


图 12 钢框架平面布置

Fig. 12 Plan view of steel frame structure

结构层高均为 3.3 m,抗震设防烈度为 8 度,场地类别 II 类,地震分组 1 组,基本加速度为 0.02 g,特征周期取  $T_g = 0.35$  s 楼面永久荷载 2.8 kN/m<sup>2</sup>,可变荷载 0.5 kN/m<sup>2</sup>,不考虑风荷载作用,框架柱采用 Q345 普通工字钢,截面形式为 H200 mm × 200 mm × 20 mm × 20 mm,  $I_y = 2\ 677$  cm<sup>4</sup>,框架梁采用 Q345 工字钢,截面形式为 450 mm × 300 mm × 12 mm × 12 mm。

从数据库中选取震级为 7.5 度以上的地震波对结构进行动力时程分析,结构最大层间位移角如图 13 所示,最大层间位移角为

1/52,接近《规范》中规范的弹塑性位移角限值 1/50,处于比较危险的状态。选取该框架进行新型 BRB 构件的设计。

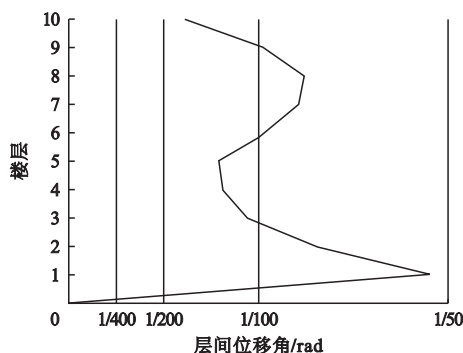


图 13 主方向最大层间位移角曲线

Fig. 13 Maximum inter-storey drift curve in main direction

## 4.2 设计流程

### 4.2.1 SMA 角钢设计

由式(2)可得,核心耗能角钢长度  $L_c = 1450$  mm,根据式(3)和(4)进行校核,当  $\alpha = 1/250$  时,  $\varepsilon_b = 0.01 \leq 0.02$ ,当  $\alpha = 1/50$  时,  $\varepsilon_b = 0.05 \geq 0.04$ 。即在小震和中大震作用下,核心构件的应变满足材料性能要求。

由 SMA 材料简化本构模型可得,核心耗能部件名义弹性模量  $E_n = 12.5$  GPa。新型 BRB 与框架抗侧刚度比  $\beta$  取 1, SMA 角钢与高强弹簧刚度比  $\gamma$  取 2,变形集中因子  $\rho = 0.21$ ,由式(9)可得, BRB 核心耗能段等效截面积  $A'_c = 1472$  mm<sup>2</sup>,由式(12)可得,  $A_c = 981.33$  mm<sup>2</sup>,查型钢规格表可得, SMA 角钢边宽度  $b_s = 40$  mm,边厚度  $d_s = 3$  mm。

### 4.2.2 约束部件尺寸设计及校核

根据 SMA 角钢尺寸进行约束部件尺寸设计,约束部件采用 Q345 热轧钢,由式(13)~(19)及式(21)~(26)可以确定约束部件各项尺寸,具体尺寸参数计算过程省略,以下仅计算强度校核所需的物理量。

SMA 耗能角钢固定段长度  $L_{s,f} = 360$  mm,内约束套筒截面高度  $H_{b,c} = 150$  mm,套筒与活塞之间间隙取  $v_0 = 5$  mm,内约束部件材料厚度  $d_b$  初选 5 mm,内约束

活塞截面高度  $H_p = 135$  mm。外约束部件截面高度  $H_b = 175$  mm,由各部件截面尺寸可求得各部件极惯性矩。

根据式(20)可得:

$$P_{cr,g1} = 2.71 \times 10^4 \text{ kN};$$

$$P_{cr,g2} = 2.99 \times 10^4 \text{ kN}.$$

当核心耗能构件应变达到 0.08 时,新型 BRB 所受轴向力  $F_y = 1.47 \times 10^3$  kN,小于整体临界屈曲荷载,整体稳定性满足要求。

根据式(25)确定核心段稳定系数  $\zeta = 11.06$  根据约束构件的截面尺寸,可以得到约束部件的中央弯矩最大值  $M_{C,max}^R = 9.35 \times 10^4$  N·m,根据式(29),代入  $y_0 = v_0 = 5$  mm,得到不等式左侧结果等于 0.06,远大于不等式右侧,所以新型 BRB 约束部件稳定性满足要求。

### 4.2.3 螺栓连接设计

贾连光等<sup>[16]</sup>对高强螺栓连接节点进行了有限元分析,提出了螺栓数量、直径等对节点承载力的影响,结合该结果并根据部件尺寸估算 SMA 角钢连接螺栓数量。根据式(30)可以求得单个螺栓所承受最大剪力为 62.26 kN,摩擦系数取  $\mu = 0.4$ ,需满足螺栓予拉力  $N \geq 172$  kN,可以选取 3 颗 10.9 级 M22 高强螺栓进行连接(选取方式不唯一)。

根据式(31)进行弹簧连接螺栓设计。当  $n = 4$  时,螺栓予拉力  $N \geq 77$  kN,选择 4 颗 10.9 级 M16 螺栓可以满足需求。

根据式(32)进行外约束部件螺栓连接设计,试取单侧螺栓数 20 颗,经计算螺栓选择 8.8 级 M16 螺栓即可满足要求。

综上,构件设计完成。

## 5 结论

(1)基于 SMA 的可恢复功能 BRB 构件适宜在层间位移角较大的柔性结构中使用,有利于保证 SMA 耗能角钢能够达到最大耗能能力。

(2)新型 BRB 构件可根据钢框架对侧



移刚度的需求进行设计,同时满足可恢复变形和耗能需求。

(3)基于SMA的可恢复功能BRB约束构件截面形式具有很高的稳定性冗余度,但核心部分的螺栓连接强度冗余度不足,设计过程中需仔细验算。

## 参考文献

- [1] CHRISTOPOULOS C, TREMBLAY R, KIM H J. Self-centering energy dissipative bracing system for the seismic resistance of structures: development and validation [J]. Journal of structural engineering, 2008, 134(1): 96-107.
- [2] MILLER D J, FAHNESTOCK L A, EATHERTON M R. Self-centering buckling-restrained braces for advanced seismic performance [C]. Las Vegas: Structures congress, ASCE, 2011.
- [3] 徐龙河, 要世乾. 自复位耗能支撑滞回性能试验研究与有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(11): 158-165.  
(XU Longhe, YAO Shiqian. Experimental study and finite element simulation on hysteretic performance of self-centering energy dissipation brace [J]. Journal of building structures, 2018, 39(11): 158-165.)
- [4] 董金芝. 基于大直径SMA棒材自复位装置的试验研究[J]. 结构工程师, 2018, 34(4): 101-108.  
(DONG Jinzhi. Experimental research on the self-centering device based on large diameter SMA bar [J]. Structural engineers, 2018, 34(4): 101-108.)
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2010.)
- [6] 罗文斌, 钱稼茹. 钢筋混凝土框架基于位移的抗震设计[J]. 土木工程学报, 2003(5): 22-29.  
(LUO Wenbin, QIAN Jiaru. Displacement-based seismic design for RC frames [J]. China civil engineering journal, 2003(5): 22-29.)
- [7] 蔡健, 周靖, 方小丹. 钢筋混凝土框架中震可修标准及简化抗震设计方法[J]. 地震工程与工程振动, 2006, (2): 13-19.  
(CAI Jian, ZHOU Jing, FANG Xiaodan. Repairable level under moderate earthquake action and seismic design method for RC frame buildings [J]. Earthquake engineering and engineering dynamics, 2006(2): 13-19.)
- [8] AISC341-10-2010. Seismic provisions for structural steel buildings [S]. Virginia: American Institute of Steel Construction, 2010.
- [9] 潘毅, 高亮, 易路行, 等. 基于剪力比和刚度比的防屈曲支撑-RC框架抗震设计方法分析[J]. 世界地震工程, 2017, 33(4): 59-67.  
(PAN Yi, GAO Xian, YI Luxing, et al. Investigation of the seismic design method of buckling-restrained brace-reinforced concrete frame structures based on shear ratio and stiffness ratio [J]. World earthquake engineering, 2017, 33(4): 59-67.)
- [10] 赵瑛, 郭彦林. 防屈曲支撑框架设计方法研究[J]. 建筑结构, 2010, 40(1): 38-43.  
(ZHAO Ying, GUO Yanlin. Research on design method of buckling restrained braced frames [J]. Building structure, 2010, 40(1): 38-43.)
- [11] 刘璐. 自复位防屈曲支撑结构抗震性能及设计方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.  
(LIU Lu. Seismic behavior and design of structure with self-centering buckling-restrained braces [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.)
- [12] 刘建彬. 防屈曲支撑及防屈曲支撑钢框架设计理论研究[D]. 北京: 清华大学, 2005.  
(LIU Jianbin. Research on the design theory of buckling-restrained braces and buckling-restrained braced frames [D]. Beijing: Tsinghua University, 2005.)
- [13] 周云, 龚晨, 陈清祥, 等. 开孔钢板装配式屈曲约束支撑减震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(8): 101-107.  
(ZHOU Yun, GONG Chen, CHEN Qingxiang, et al. Experimental study on seismic performance of perforated steel-plate assembled buckling-restrained brace [J]. Journal of building structures, 2016, 37(8): 101-107.)
- [14] 李幅昌, 张洪恩, 杨志坚, 等. 核心单元开孔对新型铝合金内芯屈曲约束支撑性能影响分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 35(3): 402-410.  
(LI Guochang, ZHANG Hongen, YANG zhijian, et al. Analysis on performance of new aluminum alloy core buckling-restrained braces under different hole fraction of core plate [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(3): 402-410.)
- [15] 谢晓彪. 不同预紧力影响下高强螺栓摩擦型连接的有限元分析及试验研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2014.  
(XIE Xiaobiao. The finite element analysis and experimental study of friction high-strength bolt connection under different preload [D]. Nanchang: Nanchang University, 2014.)
- [16] 贾连光, 邢贵洋, 王升博, 等. 高强螺栓端板连接节点的非线性有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2005, 21(6): 630-634.  
(JIA Lianguang, XING Guiyang, WANG Shengbo, et al. Nonlinear finite element analysis of high-strength bolt end-plate connection joints [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2005, 21(6): 630-634.)  
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)