

# 防屈曲耗能支撑与框架节点的连接设计\*

Study on Design of Connection Between Buckling - Restrained Brace and Frame Joint

张磊, 王婷

(陕西铁路工程职业技术学院, 陕西渭南 714000)

**摘要:** 防屈曲耗能支撑作为一种新型的消能减震元件, 已被广泛、成功地应用于既有框架结构的抗震加固中。为使结构在地震作用下表现出良好的抗震效果, 需保证防屈曲钢支撑与框架具备优良的协同工作性能, 因此支撑与框架之间的连接性能尤为重要。防屈曲钢支撑与框架节点之间的连接方法有焊缝连接、螺栓连接以及销轴连接。通过对节点板-框架连接处和节点板-支撑连接处进行受力分析, 破坏形态分析, 完善了加支撑框架节点处的计算公式。

**关键词:** 防屈曲耗能支撑; 框架结构; 协同工作; 连接性能; 连接方法

**中图分类号:** TU375.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 03-0120-05

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.03.023

ZHANG Lei, WANG Ting

(Shaanxi Railway Institute, Weinan 714000, China)

**Abstract:** As a new energy consumption components, Buckling - Restrained Brace has been widely and successfully applied to the seismic strengthening of frame structure. To make the structure under seismic excitation showed good seismic behavior, excellent performance of collaborative work between Buckling - Restrained Brace and frame structure should be guaranteed, hence the connection performance of the two should be take seriously. Weld - connection, bolt - connection and pin - connection are common connection methods between Buckling - Restrained Brace and frame structure. In this paper, through the force analysis and failure mode analysis of joint plate - frame and joint plate - brace, the calculation formula of joint of braced frame is improved.

**Keywords:** Buckling - Restrained Brace; frame structure; collaborative work; connection performance; connection methods

## 0 引言

对于不满足现行抗震规范的既有结构或受损结构, 选用合适的加固方法使其恢复甚至超过原结构

的抗震性能, 满足抗震规范的要求显得尤为重要。建筑结构常见的加固修复方法<sup>[1]</sup>有增大截面法、外部粘钢加固法、外包钢加固法、改变受力体系加固法等。随着新型材料的不断发展, 碳纤维<sup>[2]</sup>、玄武岩纤维<sup>[3]</sup>、高性能复合砂浆钢筋网<sup>[4]</sup>等加固材料被研发出来并广泛应用。对于亟需加固的结构, 可根据不同的需求和考量选择不同的加固方法。近些年来, 一种新型的耗能元件——防屈曲耗能支撑 (Buckling - Restrained Brace, 简称 BRB) 受到人们的关注, 并逐步应用于各类工程加固中。

美国、日本、我国台湾等地的学者较早开始研究防屈曲耗能支撑在结构加固方面的作用<sup>[5-7]</sup>。1973

\* 基金项目: 陕西省教育厅 2023 年度青年创新团队科学研究计划项目 (23JP027); 陕西铁路工程职业技术学院科研基金项目 (2023KYYB - 16)。

作者简介: 张磊 (1989—), 男, 硕士, 讲师, 研究方向: 高性能混凝土。

收稿日期: 2023-01-15

年, Wakabayashi 等<sup>[8]</sup>研发墙板式防屈曲支撑; 1980 年, Wada 教授研制出无黏结支撑, 并对其进行了性能试验; 1999 年, Clark 等做了 3 个大比例防屈曲支撑试验<sup>[9]</sup>, 试验结果表明支撑滞回性能良好; 2002 年, 蔡克铨等<sup>[10]</sup>对 T 形和十字形两种不同截面形式的防屈曲支撑进行研究后, 发明出一种新型双钢管型防屈曲支撑 (由双核心单元和双约束单元构成), 这种新型防屈曲支撑不仅解决了连接段长度过长且螺栓较多的问题, 而且其抗疲劳性能良好。

近年来, 我国对防屈曲支撑的研究逐步增多且加深, 西安建筑科技大学杨勇教授的科研团队研究防屈曲支撑加固框架结构<sup>[11-13]</sup>已有数年, 研究表明采用防屈曲支撑加固框架结构存在以下优势: 第一, 可以大幅度提升结构的抗侧刚度及承载能力; 第二, 拉、压状态下均可达到全截面屈服, 充分发挥耗能器的作用; 第三, 在框架结构中增设防屈曲支撑, 施工便捷; 第四, 支撑和框架结构的协同工作性良好; 第五, 防屈曲支撑造价合理。鉴于此, 目前防屈曲耗能支撑逐渐应用于框架结构的加固。框架与支撑之间以节点板相连, 节点板作为传力桥梁, 其连接性能的好坏将直接影响结构的整体性能。因此, 本文主要研究节点板与框架以及支撑的连接设计方法。

## 1 节点板与框架的连接设计

节点板作为框架与防屈曲钢支撑连接的一个关键构件, 它的一端与框架节点梁、柱端部相连接, 另一端与防屈曲钢支撑的端部相连接。图 1 即为节点板与梁、柱端连接示意图, 连接方法采用焊缝连接。此连接方法不会削弱构件截面, 刚度大, 连接的密封性好, 施工方便, 易采用自动化操作; 缺点在于焊

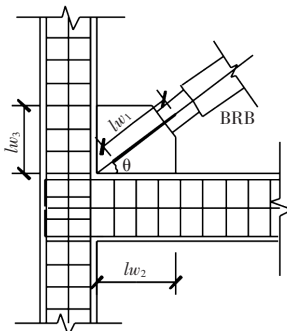


图 1 节点连接示意图  
Fig. 1 Connection joint

接残余应力及残余变形对结构有不利影响。

为保证防屈曲约束支撑的耗能能力, 节点连接承载力不应低于支撑极限承载力的 1.2 倍, 故以  $1.2N_{bu}$  作为节点连接承载力设计值, 节点板与梁端焊缝所受正应力、剪应力应分别满足下式:

$$\begin{cases} \sigma = \frac{0.6N_{bu} \sin \theta}{tl_{w2}} \leq f_c^w \text{ 或 } f_t^w \\ \tau = \frac{0.6N_{bu} \cos \theta}{tl_{w2}} \leq f_v^w \end{cases} \quad (1)$$

由式 (1) 可求出焊接在梁端的节点板边长  $l_{w2}$ , 同理可求出焊接在柱端的节点板边长  $l_{w3}$ 。从几何关系的角度看, 节点板的两个边长  $l_{w2}$ 、 $l_{w3}$  和节点板加劲肋长度  $l_{w1}$  应该符合以下关系:

$$\sqrt{l_{w2}^2 + l_{w3}^2} > l_{w1} \quad (2)$$

若焊缝受到各种综合力的作用时, 还应该满足以下算公式

$$\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq 1.1f_t^w \quad (3)$$

式中:  $t$  为节点板厚度;  $l_{w1}$ 、 $l_{w2}$ 、 $l_{w3}$  分别为节点板加劲肋长度、焊接于梁端以及柱端的节点板边长;  $f_t^w$ 、 $f_c^w$ 、 $f_v^w$  分别为焊缝的抗拉、抗压、抗剪强度设计值;  $\theta$  为支撑轴线与梁轴线之间的夹角 (取小于  $90^\circ$  的数值)。

## 2 节点板与防屈曲支撑的连接设计

为保证支撑和框架具备良好的协同工作性能, 不仅要保证节点板与框架梁、柱端连接良好, 还要保证节点板与支撑连接的稳固性。节点板与钢支撑的连接方法有高强度螺栓连接、焊接连接和销轴连接, 工程中针对具体情况可采用相应的连接方法。

### 2.1 高强度螺栓连接设计

#### 2.1.1 高强度螺栓抗剪连接

从受力特征分析, 高强度螺栓抗剪连接分为摩擦型和承压型两类<sup>[14]</sup>。摩擦型连接依靠被连接构件之间的摩擦力来传递剪力, 剪切变形小, 弹性性能好, 可以减小支撑与节点板连接处的滑移, 其对安装精度要求较低且安装方便; 缺点是螺栓数目较多时, 连接段过长会导致支撑屈服段缩短。当高强度螺栓采用抗剪连接方式时 (图 2 (a)), 因为单个高强度摩擦型螺栓的抗剪承载力设计值<sup>[14]</sup>为

建筑结构

$$N_v^b = 0.9n_f\mu P \quad (4)$$

因此，所需抗剪螺栓数量

$$n \geq \frac{1.2N_{bu}}{N_v^b} \quad (5)$$

式中： $n_f$ 为螺栓的传力摩擦面数； $\mu$ 为摩擦面抗滑移系数； $P$ 为单个螺栓的设计预拉力； $N_{bu}$ 为支撑的极限承载力。

2.1.2 高强度螺栓抗拉连接

当高强度螺栓采用抗拉连接方式时（图2（b）），因为单个高强度螺栓的抗拉承载力设计值<sup>[14]</sup>为

$$N_t^b = 0.8P \quad (6)$$

因此所需抗拉螺栓数

$$n \geq \frac{1.2N_{bu}}{N_t^b} \quad (7)$$

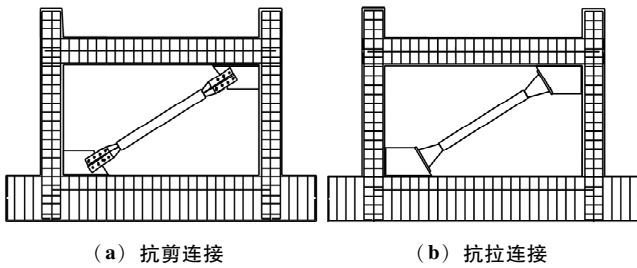


图2 螺栓连接方式  
Fig. 2 Bolt - connection joint

2.2 焊接连接设计

焊接连接对焊缝等级要求高。图1为节点板与钢支撑的焊接连接示意图，为保证焊接连接在平面内的稳定性，在节点板两侧各增设1道加劲肋。

支撑与节点板的焊缝形式为对接焊缝，其长度设为 $l_w$ ，节点板厚度为 $t$ ，则焊缝应力应符合

$$\sigma = \frac{1.2N_{bu}}{tl_w} \leq f_t^w \text{ 或 } f_c^w \quad (8)$$

设节点板加劲肋厚度为 $t_1$ ，则节点板两侧加劲肋长度 $l_{w1}$ 应符合

$$l_{w1} = \frac{0.6N_{bu}}{t_1 f_v^w} \quad (9)$$

2.3 销轴连接设计

销轴是一类标准紧固件<sup>[15]</sup>，近年来在建筑中被广泛应用于空间结构支座及节点连接设计中<sup>[16]</sup>。对于采用支撑加固的框架结构，通过销轴将节点板与支撑铰接连接，释放了节点板与支撑连接处的转动，当主体结构发生位移时，支撑不会产生额外的

弯矩，但此种连接方式对安装精度要求很高。图3为销轴连接方式示意图，焊接在框架节点梁、柱端部的节点板与支撑端部的两块接头板共同组成销轴耳板，构成双剪连接形式。销轴连接的关键问题是销轴及销轴耳板的设计。

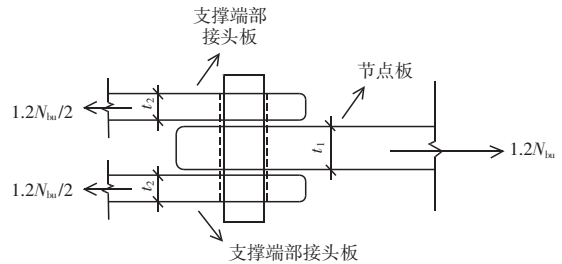


图3 销轴连接方式示意图  
Fig. 3 Diagram of pin - connection

2.3.1 销轴设计

销轴的破坏一般表现为以下几种形式：销轴承压破坏、销轴剪切破坏、销轴弯曲破坏。销轴承压破坏取决于销轴及耳板的抗压承载力，以两者中抗压承载力较小者为准，在一般的设计中，均为耳板的抗压承载力控制承压破坏。剪切破坏一般发生在销轴两侧相邻两耳板间的剪切面上。关于销轴弯矩存在不同的计算方法，我国JTG D64—2015《公路钢结构桥梁设计规范》规定<sup>[17]</sup>：当销的长度大于直径的2倍时，对承受挠曲的销可按简支梁进行近似计算，并假定各集中力作用在和销接触的的各板条的轴向上。《建筑结构用销轴设计方法》<sup>[18]</sup>中将耳板传递给销轴的作用力按均布荷载考虑。《钢结构销轴节点的设计》<sup>[19]</sup>将此两种方法推导的的销轴计算弯矩进行了比较。我国GB 50017—2017《钢结构设计标准》对此并无相关说明条文，本文假定销轴在与耳板接触处受均布应力作用。图4为销轴内力图，从图中可知，A-A截面为弯矩最大截面，B-B截面上弯矩、剪力都较大，同样属于危险截面。

销轴承压强度、抗剪强度、抗弯应分别满足下式：

$$\begin{cases} \sigma_c = \frac{1.2N_{bu}}{d \sum t} \leq f_c^p \\ \tau = \frac{4.8N_{bu}}{n_v \pi d^2} \leq f_v^p \\ \sigma_b = \frac{64M}{3\pi d^3} \leq f^p \end{cases} \quad (10)$$

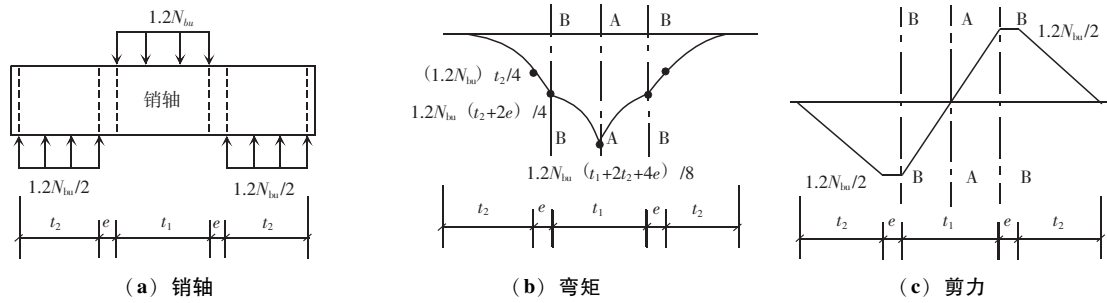


图4 销轴计算简图及内力图  
Fig. 4 Diagram of pin internal force

式中： $d$ 为销轴直径； $n_v$ 为销轴抗剪面数目； $\sum t$ 为同一受力方向销轴耳板的厚度； $M$ 为销轴计算截面的弯矩设计值； $f_c^p$ 为销轴连接耳板的承压强度设计值； $f_v^p$ 为销轴抗剪强度设计值； $f^p$ 为销轴抗弯强度设计值。

对于同时受弯矩、剪力的截面，如图4中的B-B截面，还需按以下公式验算组合强度：

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_b}{f^p}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{f_v^p}\right)^2} \leq 1 \quad (11)$$

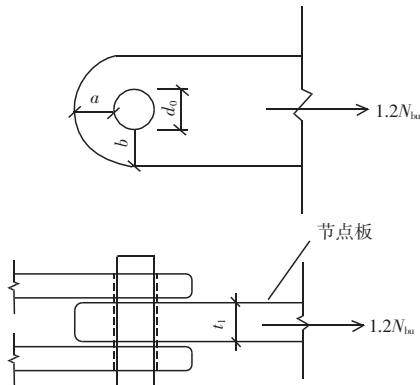
### 2.3.2 连接耳板设计

图5为销轴连接耳板示意图。销轴连接耳板的破坏形式主要表现为：耳板孔边净截面处拉断、孔顶拉裂破坏、耳板端部冲切破坏。常见的防屈曲耗能支撑与框架的连接采用三耳板连接，无论是焊接于节点梁、柱端的节点板，还是支撑端部的两块接头板，都应避免破坏的发生。

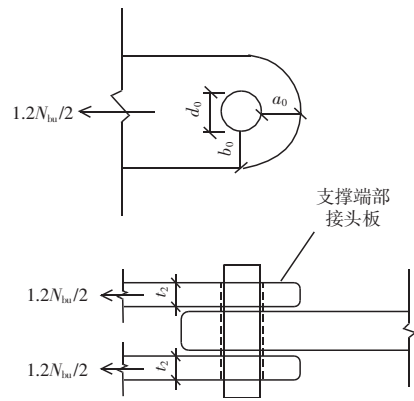
#### (1) 销轴耳板净截面抗拉强度

对于节点板而言，孔净截面抗拉强度

$$\sigma = \frac{0.6N_{bu}}{t_1 b_1} \leq f_t \quad (12)$$



(a) 销轴连接处节点板受力简图



(b) 销轴连接处支撑端部接头板受力简图

图5 销轴连接耳板示意图

Fig. 5 Diagram of the pin trunnion plate

$$b_1 = \min \left\{ 2t_1 + 16, b - \frac{d_0}{3} \right\} \quad (13)$$

对于防屈曲钢支撑端部接头板而言，孔净截面抗拉强度

$$\begin{cases} \sigma = \frac{0.3N_{bu}}{t_2 b_2} \leq f_t \\ b_2 = \min \left\{ 2t_2 + 16, b_0 - \frac{d_0}{3} \right\} \end{cases} \quad (14)$$

#### (2) 销轴耳板端部截面抗拉（劈开）强度 节点板端部截面抗拉（劈开）强度

$$\sigma = \frac{1.8N_{bu}}{t_1(3a - 2d_0)} \leq f_t \quad (15)$$

#### 防屈曲钢支撑端部截面抗拉（劈开）强度

$$\sigma = \frac{0.9N_{bu}}{t_2(3a_0 - 2d_0)} \leq f_t \quad (16)$$

#### (3) 销轴耳板抗剪强度

图6为销轴耳板抗剪宽度示意图。节点板的抗剪强度应满足

## 建筑结构

$$\begin{cases} \tau = \frac{0.6N_{bu}}{t_1 Z_1} \leq f_v \\ Z_1 = \sqrt{\left(a + \frac{d_0}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_0}{2}\right)^2} \end{cases} \quad (17)$$

防屈曲钢支撑端部接头板的抗剪强度

$$\begin{cases} \tau = \frac{0.3N_{bu}}{t_2 Z_2} \leq f_v \\ Z_2 = \sqrt{\left(a_0 + \frac{d_0}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_0}{2}\right)^2} \end{cases} \quad (18)$$

式中： $t_1$ 、 $t_2$  分别为节点板以及支撑端部接头板的厚度； $b_1$ 、 $b_2$  分别为节点板以及支撑端部接头板的计算宽度； $f_v$  为销轴耳板的抗拉强度设计值； $d_0$  为销轴孔径； $Z_1$ 、 $Z_2$  分别为节点板以及支撑端部接头板的抗剪截面宽度； $f_v$  为销轴连接耳板的抗剪强度设计值。

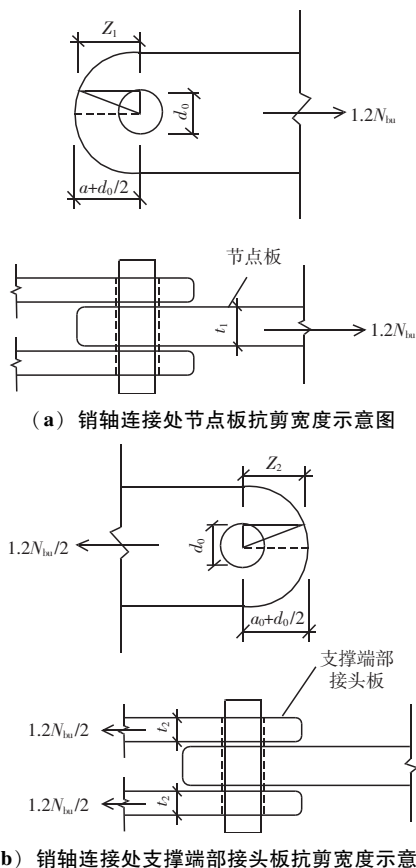


图 6 销轴耳板抗剪宽度示意图

Fig. 6 Diagram of the shear width of the pin trunnion plate

### 3 小结

对于不满足现行抗震规范要求的框架结构，采用

防屈曲耗能支撑予以加固，可以大幅提高结构的抗震性能。针对防屈曲钢支撑与框架结构常用的三种连接方法—焊接、高强螺栓连接以及销轴连接，分析其优缺点、适用范围，可能存在的破坏形式和强度计算公式，以及在支撑加固框架结构体系中的设计方法，这对于指导工程中支撑与框架的连接具有实际意义。

### 参考文献

- [1] 唐红元. 既有建筑结构检测鉴定与加固. [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2017.
- [2] 余琼, 陆洲导. 受损对碳纤维加固框架节点的影响 [J]. 同济大学学报, 2004 (2): 177-181.
- [3] 周运瑜, 余江滔, 陆洲导, 等. 玄武岩纤维加固震损混凝土框架节点的抗震性能 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2010, 41 (4): 1514-521.
- [4] 卜良桃. 高性能复合砂浆钢筋网加固 RC 梁的性能研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2006.
- [5] AIKEN ID, MAHIN SA, URIZ P. Large-scale testing of buckling-restrained braced frames [J]. In: Proceedings, the Japan passive control symposium. Japan: Tokyo Institute of Technology; 2002: 35-44.
- [6] SABELLI R, MAHIN S A, CHANG C. Seismic demands on steel braced-frame buildings with buckling-restrained braces [J]. Engineering Structures 2003, 25 (5): 655-666.
- [7] 张家广. 防屈曲支撑加固钢筋混凝土框架抗震性能及设计方法 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [8] WAKABAYASHI M, NAKABURA T. Experimental study of elasto-plastic properties of precast concrete wall panels with built-insulating braces [C]. //Summaries of Technical Papers of Annual Meeting. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 1973: 1041-1044.
- [9] 蔡益燕, 钱稼茹, 郁银泉. 偏心支撑框架设计新进展 [J]. 建筑结构, 2011 (4): 7-10.
- [10] 蔡克铨, 黄彦智, 翁崇兴. 双管式挫屈束制 (屈曲约束) 支撑之耐震行为与应用 [J]. 建筑钢结构进展, 2005 (3): 1-8.
- [11] 马晨光, 杨勇, 刘如月, 等. 防屈曲单斜支撑加固钢筋混凝土框架抗震性能试验研究 [J]. 工业建筑, 2016, 46 (4): 1-7.
- [12] 伊波松, 杨勇, 刘如月, 等. 防屈曲中心支撑加固钢筋混凝土框架结构抗震性能试验研究 [J]. 工业建筑, 2016, 46 (4): 8-11, 17.
- [13] 刘如月, 杨勇, 伊波松, 等. 防屈曲偏心支撑加固钢筋混凝土框架结构抗震性能试验研究 [J]. 工业建筑, 2016, 46 (4): 12-17.
- [14] 戴国欣. 钢结构 [M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2007.
- [15] 李英亮. 紧固件概论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [16] 丁大益, 王元清, 潘斌, 等. 大跨度楼面桁架销轴节点承载性能试验研究 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2016 (1): 76-82.
- [17] 公路钢结构桥梁设计规范: JTG D64-2015 [S], 2015.
- [18] 卢家森. 建筑结构用销轴设计方法 [J]. 建筑钢结构进展, 2016 (6): 52-56, 71.
- [19] 许强, 朱俞江. 钢结构销轴节点的设计 [J]. 浙江建筑, 2014 (5): 15-19.