

文章编号:1673-2049(2015)04-0080-06

# 交叉加劲钢板深梁弹性屈曲分析

江力强<sup>1</sup>, 郑 宏<sup>2</sup>, 赵 鹏<sup>2</sup>, 袁晓洒<sup>2</sup>

(1. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

**摘要:**以交叉加劲钢板深梁为研究对象,利用有限元软件 ANSYS 分析其弹性屈曲性能,讨论了抗弯刚度比、跨高比、钢板深梁厚度对其弹性屈曲性能的影响;考虑钢板深梁在钢框架的弯剪受力特性,根据板的经典理论建立了交叉加劲钢板深梁屈曲荷载计算公式,提出了等效屈曲系数。结果表明:交叉加劲钢板深梁的临界屈曲荷载随抗弯刚度比增大而增大,但达到门槛刚度比后,增大幅度急剧减小,得到门槛刚度比约为 10;临界屈曲荷载随跨高比和板厚的减小而减小,等效屈曲系数随板厚减小而增大;等效屈曲系数与跨高比关系曲线由二次抛物线形向波浪形渐变,交叉加劲钢板深梁受力特性由剪切主导向弯曲主导过渡。

**关键词:**交叉加劲;钢板深梁;屈曲荷载;门槛刚度比;等效屈曲系数

中图分类号:TU375.1

文献标志码:A

## Elastic Buckling Analysis on Steel Plate Deep Beam with Diagonal Stiffeners

JIANG Li-qiang<sup>1</sup>, ZHENG Hong<sup>2</sup>, ZHAO Peng<sup>2</sup>, YUAN Xiao-sa<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China;

2. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

**Abstract:** The elastic buckling behavior of steel plate deep beam with diagonal stiffeners was studied using finite element analysis software ANSYS. The influences of bending stiffness ratio, span-depth ratio, thickness of steel plate deep beam on elastic buckling were discussed; Considering bending shear stress characteristic of steel plate deep beam in steel frame, the calculation formula for buckling load of steel plate deep beam with diagonal stiffeners was introduced by using the classic theory of plate and equivalent buckling coefficient. The results show that critical buckling load increases when bending stiffness ratio increases, but the increment sharply decreases while bending stiffness ratio is equal to threshold stiffness ratio which is about 10. The critical buckling load decreases when span-depth ratio and thickness of plate decrease. The equivalent buckling coefficient increases when thickness of the plate decreases. The curves of equivalent buckling coefficient and span-depth ratio change from shape of second-degree parabola to wave of gradient when thickness of plate decreases. It means that the mechanical properties of steel plate deep beam with diagonal stiffeners are from shear to bend.

**Key words:** diagonal stiffener; steel plate deep beam; buckling load; threshold stiffness ratio; equivalent buckling coefficient

收稿日期:2015-01-12

基金项目:国家自然科学基金项目(50678025);陕西省留学人员科技活动择优资助项目(SLZ2008008);

中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2012TD012)

作者简介:江力强(1992-),男,江西九江人,工学博士研究生,E-mail:qiang\_1992@st.chd.edu.cn.

0 引言

钢框架内填钢板深梁与钢框架内填钢板剪力墙是 2 种抗侧力体系,它们都具有较高的初始刚度和承载力,同时具有良好的延性和耗能能力<sup>[1-8]</sup>。钢板深梁相比钢板剪力墙有以下特点:钢板不与柱相连,仅与梁相连,符合“强柱弱梁”的设计思路;能够实现宽度范围内结构刚度调幅;受力变形以弯曲变形为主,利于材料塑形发展;在框架结构中布置灵活,便于过道和门窗的布置等。加拿大和美国已将钢板剪力墙列入规范设计条文中<sup>[9-10]</sup>,中国也将钢板剪力墙列入规程附录中<sup>[11]</sup>,各国也提出了两侧边开缝剪力墙<sup>[12]</sup>、三边约束钢板剪力墙<sup>[13]</sup>和带竖缝钢板剪力墙<sup>[14]</sup>等形式的抗侧力体系。对于钢板深梁抗侧力体系中国已经进行了相关研究<sup>[15-16]</sup>,文献<sup>[17]</sup>通过弹性力学的半逆解法求得钢板深梁在水平荷载作用下的应力分布,文献<sup>[18]</sup>也对两侧加劲钢板深梁进行过试验分析和计算理论研究,但是各国尚未有对交叉加劲钢板深梁体系进行过相关研究。

中国《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ 99—98)<sup>[11]</sup>中提到,钢板墙作为抗侧力构件使用时,不允许钢板墙出现局部屈曲,那么对于交叉加劲钢板深梁抗侧力体系的屈曲分析显得尤为重要。加劲肋将钢板划分为 4 个三角形区域,难于用经典板理论的 Levy 解法得到其精确解<sup>[19]</sup>,运用 ANSYS 有限元分析软件是一种有效的方法<sup>[20-22]</sup>。本文运用 Eigenvalue Buckling 的分析方法,以钢板深梁跨高比、钢板厚度、肋板与钢板抗弯刚度比为主要影响参数,分析各参数对钢板深梁屈曲性能的影响。

1 钢板深梁的简化模型

钢板深梁抗侧力体系是将钢板深梁内置于框架结构体系中,其布置如图 1 所示,几何参数如图 2 所示,其中, $l$  为跨度, $t$  为钢板厚度, $h$  为钢板宽度, $b_i$  为加劲肋的宽度。

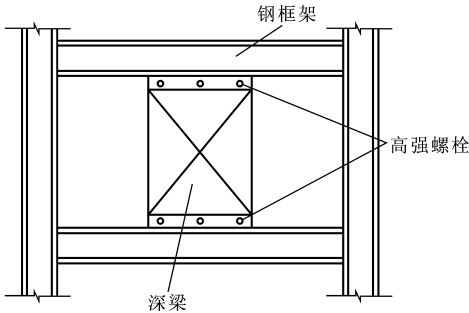


图 1 钢板深梁抗侧力体系

Fig. 1 Lateral Resistant System of Steel Plate Deep Beam

钢板两端与上下层框架梁通过高强螺栓连接,框架柱承受竖向力,内填钢板深梁只承受水平力作用。当受侧向力作用时,钢板深梁弯剪变形,不同于剪力墙的剪切变形。斜向交叉加劲肋沿钢板对角线方向焊接双面布置,加劲肋的长度为  $l_i$ ,宽度为  $b_i$ ,厚度为  $t_c$ ,构件参数如表 1 所示。

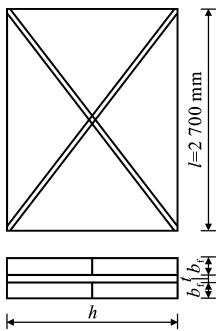


图 2 几何参数

Fig. 2 Geometric Parameters

表 1 构件参数

Tab. 1 Component Parameters

跨高比 $\alpha$	钢板宽度 $h/\text{mm}$	加劲肋长度 $l_i/\text{mm}$	
		左交叉	右交叉
2.00	1 350	3 019	3 019
1.80	1 500	3 089	3 089
1.50	1 800	3 245	3 245
1.20	2 250	3 515	3 515
1.00	2 700	3 818	3 818
0.75	3 600	4 500	4 500

对钢板深梁的边界条件进行简化,如图 3 所示,即钢板底部嵌固,上部水平定向移动,左右两侧为自由边界。简化后受力条件为在钢板上端平面内仅受单向水平静力作用。钢板深梁简化后的受力情况如图 4 所示,其中, $M$  为钢板深梁所受弯矩, $V$  为所受水平荷载, $M=-Vl/2$ ,钢材强度为 Q235B。

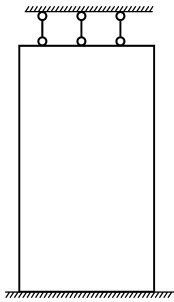


图 3 钢板的边界条件

Fig. 3 Boundary Condition of Steel Plate

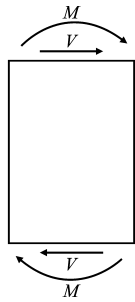


图 4 钢板的受力

Fig. 4 Forces of Steel Plate

2 分析参数

为研究各种参数对交叉加劲钢板深梁的影响,本文中引入钢板深梁的主要参数有:钢板深梁的跨高比  $\alpha=l/h$ ,加劲肋厚度与钢板的厚度比  $\gamma=t_c/t$ ,钢板深梁加劲肋与钢板的抗弯刚度比  $\beta$ 。 $\beta$  可用下

式表示

$$\beta=\frac{EI_s}{Dh}\tag{1}$$

式中： $I_s$  为加劲肋截面以板中线为轴的惯性矩，并根据跨高比的角度进行旋转，具体取值方法详见文献[21]； $E$  为钢材的弹性模量； $D$  为钢板深梁的抗弯刚度， $D=\frac{Et^2}{12(1-\mu^2)}$ ， $\mu$  为钢材的泊松比。

对交叉加劲钢板深梁弹性屈曲性能分析分为 2 个部分：①研究加劲肋的加劲程度对交叉加劲钢板深梁的影响，以跨度  $l=2\ 700\ \text{mm}$ ，厚度  $t=10\ \text{mm}$  的钢板为研究对象，选取 2.0, 1.5, 1.0, 0.75 四种跨高比，通过改变抗弯刚度比来衡量加劲肋的加劲程度；②研究跨高比和钢板厚度对交叉加劲钢板深梁的影响，钢板厚度分别为 10, 12, 14, 16 mm，跨高比  $\alpha$  取 0.75~2.0，加劲肋高度均为 72 mm，所研究的交叉加劲钢板深梁加劲肋厚度均与钢板厚度一致，即  $\gamma=1.0$ 。

3 有限元屈曲分析

钢板深梁和加劲肋均采用 Solid95 实体单元，两者之间采用体相加形成一个整体，ANSYS 模型如图 5 所示。运用 Eigenvalue Buckling 的子空间迭代法进行交叉加劲钢板深梁屈曲分析。本文通过分析得出各种规格交叉加劲钢板深梁对应的前 5 阶屈曲模态，限于篇幅只列举跨高比  $\alpha=1.8$  且厚度  $t=12\ \text{mm}$  时钢板深梁的屈曲模态，如图 6 所示。

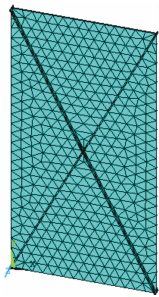


图 5 ANSYS 模型  
Fig. 5 ANSYS Model

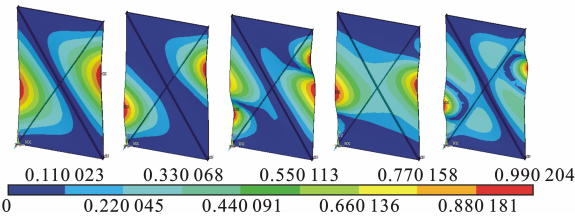


图 6  $\alpha=1.8$  且  $t=12\ \text{mm}$  时的屈曲模态

Fig. 6 Buckling Modes when  $\alpha=1.8$  and  $t=12\ \text{mm}$

3.1 抗弯刚度比的影响

以交叉加劲钢板深梁的加劲肋与钢板抗弯刚度比  $\beta$  为变量，通过调整加劲肋的宽度  $b_f$  和加劲肋厚度与钢板的厚度比  $\gamma$ ，得到其第 1 阶临界屈曲荷载随抗弯刚度比的关系曲线，如图 7 所示，其中， $V_{cr}$  为临界屈曲荷载。

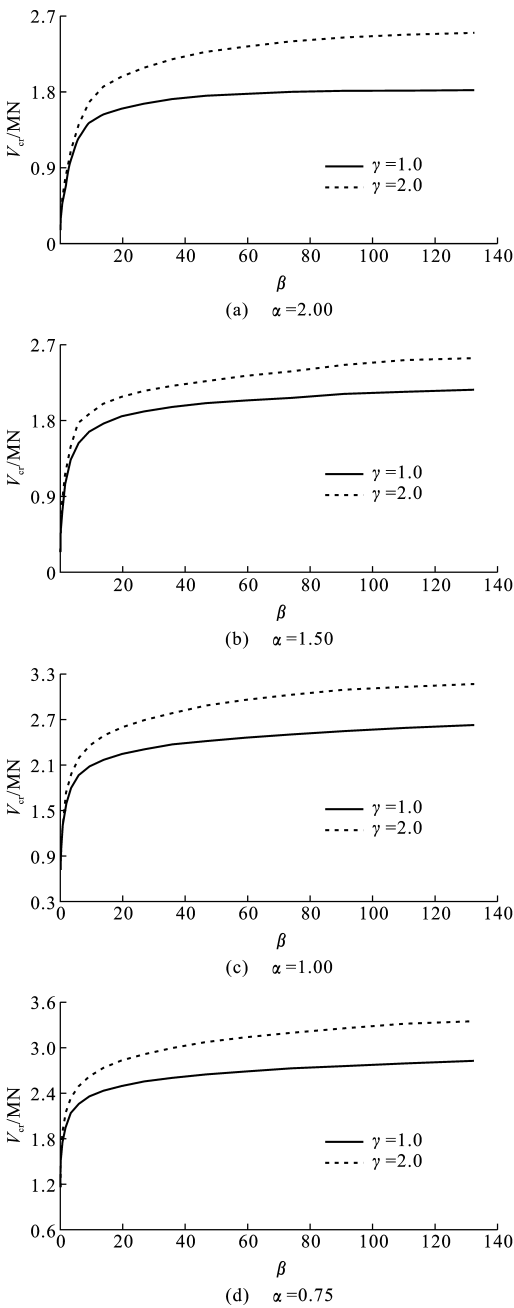


图 7  $V_{cr}$ - $\beta$  曲线

Fig. 7 Curves of  $V_{cr}$  and  $\beta$

由图 7 可知，钢板深梁在不同刚度的交叉加劲肋加劲作用下，随着抗弯刚度比的增大，其临界屈曲荷载逐渐增大。在同样的抗弯刚度比情况下，加劲肋与钢板的厚度比  $\gamma$  越大，所得临界屈曲荷载也越大。 $V_{cr}$ - $\gamma$  关系曲线呈近似双线性关系，对于各种厚度比情况下，交叉加劲钢板深梁的  $V_{cr}$ - $\gamma$  关系曲线转折点对应的抗弯刚度比均约为 10，参考文献[20]，将这个刚度比称为加劲门槛刚度比。当抗弯刚度比达到加劲门槛刚度比后，再提高加劲肋刚度对钢板深梁的临界屈曲荷载贡献相对较少，很不经

济,所得的加劲门槛刚度比可为此类构件的设计提供依据。

### 3.2 跨高比及钢板厚度的影响

以交叉加劲钢板深梁的跨高比  $\alpha$  为变量,通过改变钢板深梁的跨高比对不同厚度钢板的屈曲性能进行分析,所得前 5 阶临界屈曲荷载随跨高比的  $V_{cr}-\alpha$  曲线如图 8 所示。

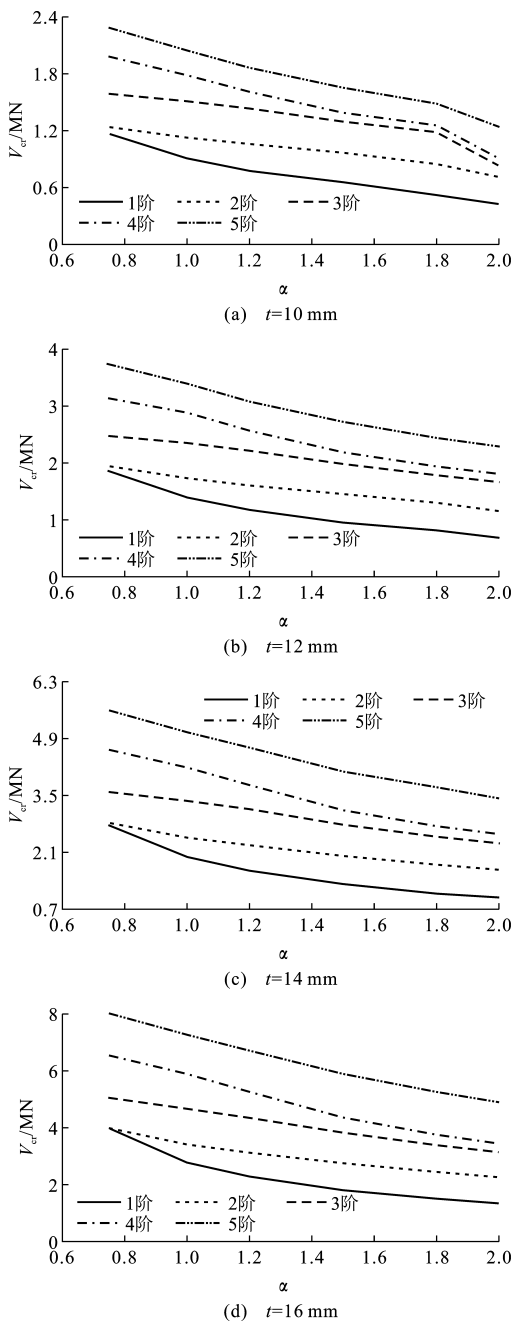


图 8  $V_{cr}-\alpha$  曲线

Fig. 8 Curves of  $V_{cr}$  and  $\alpha$

由图 8 可知:钢板深梁临界屈曲荷载  $V_{cr}$  随着跨高比  $\alpha$  的增大而减小;第 1,2 阶临界屈曲荷载随跨高比  $\alpha$  的增大而差值增大,第 3,4 阶临界屈曲荷载

随跨高比  $\alpha$  的增大而差值减小,第 2,3 阶和第 4,5 阶差值变化平稳;第 2,3 阶临界屈曲荷载呈近似线性关系,第 1,4,5 阶临界屈曲荷载均在跨高比  $\alpha=1$  附近出现拐点,其中第 1 阶临界屈曲荷载最为明显;随钢板厚度增大,临界屈曲荷载逐渐增大,并且增大的幅度随跨高比的增大而减小。

## 4 弹性屈曲分析

### 4.1 屈曲应力

根据矩形薄板屈曲应力的通用公式<sup>[23]</sup>,钢板的弹性屈曲剪应力  $\tau_{cr}$  为

$$\tau_{cr} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{t}{l}\right)^2 \quad (2)$$

式中; $k$  为关于剪应力的屈曲系数。

钢板弹性受压边缘纤维的屈曲正应力  $\sigma_{cr}$  为

$$\sigma_{cr} = \frac{k_s\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{t}{l}\right)^2 \quad (3)$$

式中; $k_s$  为关于正应力的屈曲系数。

### 4.2 钢板深梁弯剪受力的相关关系

根据文献[17]对钢板深梁抗侧力体系在水平地震荷载作用下的受力分析,可以得知对于钢板深梁而言,其受力为弯剪结合,受力形式类似工字型梁的腹板。参考 GB 50017—2003<sup>[24]</sup>,设置加劲肋后腹板计算相关方程为

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_{cr}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr}}\right)^2 \leq 1 \quad (4)$$

根据文献[17]中的受力分析,得

$$\left[\frac{3Vl/(ht)}{\sigma_{cr}}\right]^2 + \left[\frac{V/(ht)}{\tau_{cr}}\right]^2 \leq 1 \quad (5)$$

将式(2),(3)代入式(5)得

$$\frac{144V^2(1-\mu^2)^2}{(ht)^2\pi^4 E^2} \left(\frac{l}{t}\right)^4 \left[\left(\frac{1}{k}\right)^2 + \left(\frac{3}{k_s}\alpha\right)^2\right] \leq 1 \quad (6)$$

设  $f(\alpha)$  为关于钢板跨高比  $\alpha$  的函数,称为等效屈曲系数,其表达式为

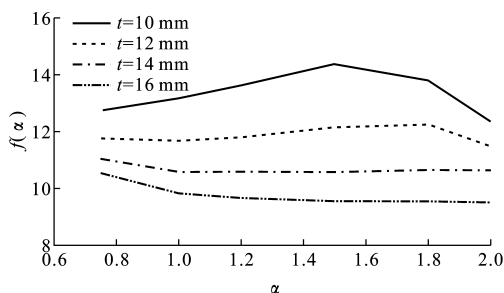
$$f(\alpha) = \left[\sqrt{\left(\frac{1}{k}\right)^2 + \left(\frac{3}{k_s}\alpha\right)^2}\right]^{-1} \quad (7)$$

根据式(6),(7)可得

$$\frac{V}{ht} \leq f(\alpha) \left(\frac{t}{l}\right)^2 \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \quad (8)$$

当  $V=V_{cr}$  时,式(8)中等号成立,即结构体系刚发生失稳。将根据 ANSYS 分析所得的临界屈曲荷载代入式(8)中,得到跨高比  $\alpha$  与等效屈曲系数  $f(\alpha)$  关系如图 9 所示。

由图 9 可知:随着跨高比的增大,各种厚度钢板深梁的等效屈曲系数变化范围不大,当跨高比保持

图9  $f(\alpha)$ 与 $\alpha$ 的关系Fig. 9 Relations of  $f(\alpha)$  and  $\alpha$ 

不变时,钢板深梁等效屈曲系数随钢板厚度减小而增大;钢板厚度  $t=10$  mm 时其等效屈曲系数与跨高比关系曲线呈波浪形,与纯弯板屈曲系数相似;钢板厚度  $t=16$  mm 时曲线呈二次抛物线形,与纯剪板屈曲系数相似;钢板厚度  $t=12, 14$  mm 时曲线介于二者之间。

## 5 结 语

(1)随着加劲肋与钢板深梁抗弯刚度比的增大,交叉加劲钢板深梁的临界屈曲荷载逐渐增大,但是当达到门槛刚度比后,再提高加劲肋刚度对钢板深梁的临界屈曲荷载贡献相对较少,很不经济。本文中研究的所有跨高比交叉加劲钢板深梁的加劲门槛刚度比均约为 10,所得结果可为此类构件的设计提供依据。

(2)在相同的抗弯刚度比下,加劲肋与钢板的厚度比越大,对应的临界屈曲荷载也越大。

(3)随着跨高比的增大,交叉加劲钢板深梁各阶临界屈曲荷载逐渐减少;随钢板厚度的增大,临界屈曲荷载逐渐增大。

(4)本文运用矩形薄板屈曲应力的通用公式,考虑钢板深梁在弯剪结合受力形式下的相关作用,提出了等效屈曲系数。计算得出的等效屈曲系数不仅与跨高比有关,也与钢板的厚度有关。钢板厚度越小,其等效屈曲系数越大。

(5)随着钢板厚度的减小,钢板深梁受力特性由剪切主导向弯曲主导过渡。

## 参考文献:

### References:

[1] 袁晓洒,郑 宏,罗景阳.不同刚度钢板深梁填充钢框架结构抗震性能分析[J].世界地震工程,2013,29(4):114-118.  
YUAN Xiao-sa,ZHENG Hong,LUO Jing-yang. Seismic Performance of Steel Frame Structure Infilled by

Steel Deep Beams with Different Stiffness[J]. World Earthquake Engineering,2013,29(4):114-118.

[2] 董宏英,刘恒超,许方方,等.钢管混凝土-钢板深梁结构抗震试验与承载力计算[J].世界地震工程,2014,30(4):120-128.

DONG Hong-ying,LIU Heng-chao,XU Fang-fang, et al. Seismic Test and Load-bearing Capacity Calculation of Structure with CFST Columns and Deep Steel Plate Beams[J]. World Earthquake Engineering,2014,30(4):120-128.

[3] 董宏英,刘恒超,武海鹏,等.钢管混凝土-钢板深梁结构抗震性能分析[J].自然灾害学报,2012,21(6):57-64.

DONG Hong-ying,LIU Heng-chao,WU Hai-peng, et al. Analysis of Seismic Behavior of Structure with CFST Columns and Deep Steel Plate Beams[J]. Journal of Natural Disasters,2012,21(6):57-64.

[4] 袁晓洒,郑 宏,于旭光.基于双折线恢复力模型的钢框架内填钢板深梁滞回耗能分析[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2013,26(3):18-22.

YUAN Xiao-sa,ZHENG Hong,YU Xu-guang. Hysteresis Energy Analysis of the Steel Plate Deep Beam Filled in the Steel Frame Based on the Bilinear Restoring Force Model[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University:Natural Science,2013,26(3):18-22.

[5] 董宏英,张 慧,曹万林,等.内置钢板深梁剪力墙抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2014,35(3):68-76.

DONG Hong-ying,ZHANG Hui,CAO Wan-lin,et al. Experimental Study on Seismic Behavior of Shear Wall with Concealed Steel Plate Deep Beams[J]. Journal of Building Structures,2014,35(3):68-76.

[6] 江力强,郑 宏,赵 鹏,等.水平荷载作用下钢板深梁弹性屈曲分析[J].建筑钢结构进展,2015,17(2):1-6,19.

JIANG Li-qiang,ZHENG Hong,ZHAO Peng,et al. Elastic Buckling Analysis on Deep Steel Plate Girders Subjected to Horizontal Loading[J]. Progress in Steel Building Structures,2015,17(2):1-6,19.

[7] 郑 宏,于旭光,毛 剑,等.钢板深梁填充钢框架结构抗震性能试验及恢复力模型[J].钢结构,2012,27(12):11-14.

ZHENG Hong,YU Xu-guang,MAO Jian,et al. The Seismic Performance Test and Restoring Force Model of Steel Plates Deep Beam Filling Steel Frame Structure[J]. Steel Construction,2012,27(12):11-14.

[8] 董宏英,于传鹏,曹万林,等.钢管混凝土-钢板深梁-混凝土条带组合剪力墙抗震性能试验研究[J].建筑

- 结构学报,2013,34(增1):193-199.
- DONG Hong-ying, YU Chuan-peng, CAO Wan-lin, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of Shear Walls with SRC Columns, Steel Plate Deep Beams and Concrete Strips[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(S1):193-199.
- [9] CAN/CSA-S16-09, Limit States Design of Steel Structures[S].
- [10] Building Seismic Safety Council. NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures[R]. Washington DC: Federal Emergency Management Agency, 2003.
- [11] JGJ 99—98, 高层民用建筑钢结构技术规程[S]. JGJ 99—98, Technical Specification for Steel Structure of Tall Buildings[S].
- [12] ASTANEH-ASL A. Seismic Behavior and Design of Steel Shear Walls[R]. San Francisco: Structural Engineers Association of Northern California, 2001.
- [13] 郭震, 袁迎曙. 三边约束受剪钢板力学特征研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2011, 38(11): 7-12. GUO Zhen, YUAN Ying-shu. Mechanical Characteristics of Steel Shear Plate Walls with Trilateral Constraint[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2011, 38(11): 7-12.
- [14] HITAKA T, MATSUI C. Experimental Study on Steel Shear Wall with Slits[J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(5): 586-595.
- [15] 郑宏, 杨飞颖, 张维刚. 钢板深梁屈曲分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2007, 24(3): 31-35. ZHENG Hong, YANG Fei-ying, ZHANG Wei-gang. Buckling Analysis on Steel Plate Deep Beam[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007, 24(3): 31-35.
- [16] 袁晓洒, 郑宏, 于长亮. 钢框架内填钢板深梁协同分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2012, 29(2): 43-47. YUAN Xiao-sa, ZHENG Hong, YU Chang-liang. Interactive Analysis of Steel Deep Beam Infilling Steel Frame[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2012, 29(2): 43-47.
- [17] 江力强, 郑宏, 袁晓洒, 等. 水平荷载作用下钢板深梁弹性力学解[J]. 工程力学, 2014, 31(2): 146-150, 163.
- JIANG Li-qiang, ZHENG Hong, YUAN Xiao-sa, et al. The Elastic Mechanics Calculation Method for a Steel Plate Deep-beam Subjected to Horizontal Loads[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(2): 146-150, 163.
- [18] JAHANPOUR A, JONSSON J, MOHARRAMI H. Seismic Behavior of Semi-supported Steel Shear Walls[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 74: 118-133.
- [19] 薛大为. 板壳理论[M]. 北京: 北京工业学院出版社, 1988. XUE Da-wei. Theory of Plate and Shells[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 1988.
- [20] 姬振华, 王德禹. 纯剪切横向密加筋板的加筋弯曲刚度门槛值[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(8): 1269-1273. JI Zhen-hua, WANG De-yu. Threshold Value of Stiffener Bending Rigidity of Transverse Densely Stiffened Plate Under Pure Shear[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2012, 46(8): 1269-1273.
- [21] 郭彦林, 陈国栋, 缪友武. 加劲钢板剪力墙弹性抗剪屈曲性能研究[J]. 工程力学, 2006, 23(2): 84-91, 59. GUO Yan-lin, CHEN Guo-dong, MIAO You-wu. Elastic Buckling Behavior of Steel Plate Shear Wall with Cross or Diagonal Stiffeners[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(2): 84-91, 59.
- [22] 武晓东, 宋波. 抗弯刚度比对加劲板屈曲性能的影响[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(11): 1352-1357. WU Xiao-dong, SONG Bo. Influence of Flexural Stiffness Ratio on the Buckling Behavior of a Stiffened Plate[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2012, 34(11): 1352-1357.
- [23] 陈骥. 钢结构稳定: 理论及设计[M]. 5版. 北京: 科学出版社, 2011. CHEN Ji. Stability of Steel Structures: Theory and Design[M]. 5th ed. Beijing: Science Press, 2011.
- [24] GB 50017—2003, 钢结构设计规范[S]. GB 50017—2003, Code for Design of Steel Structures[S].