

# 短肢墙对型钢混凝土异型边节点 抗震性能影响分析

白国良, 李瑞文, 朱佳宁

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 以某大型型钢混凝土结构主厂房为原型, 采用 ABAQUS 混凝土塑性损伤本构模型, 研究配置不同方向的短肢墙对 SRC 异型边节点抗震性能的影响程度。数值分析表明: 配置纵向短肢墙可以改善该类异型边节点延性与破坏机制, 避免“柱铰型”破坏机制出现; 配置横向短肢墙可以大幅度提高该类异型边节点承载力与刚度, 并有效地降低了刚度退化率; 配置双向短肢墙可以明显地增大该类异型边节点滞回面积, 改善抗震性能。

**关键词:** SRC 异型边节点; 抗震性能; 混凝土塑性损伤模型; 短肢墙

**中图分类号:** TU398; P315.92

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2014)06-0774-06

在工业建筑中, 由于工程工艺及设备需求, 结构中出现了大量的异型节点。例如在冶金、电力、化工和矿山等重载厂房, 为了承受较大的工业设备荷载, 梁截面需不断增大, 此时结构将出现“强梁弱柱”型异型节点。此外, 由于其他荷载, 该类异型节点上下柱截面一般会有较大的尺寸误差, 故又属于变柱截面异型节点<sup>[1]</sup>。文献对该类钢筋混凝土厂房异型节点进行了研究, 并取得了重要研究成果<sup>[2-3]</sup>; 文献[1]对该类型钢混凝土厂房异型节点进行了研究, 取得了初步研究成果, 后续尚需进一步深入分析。

型钢混凝土结构厂房是一种为大容量机组主厂房而提出的新型结构体系<sup>[1]</sup>, 研究表明该体系一定程度上提高了结构的承载力和刚度<sup>[1-4]</sup>。目前, 西北部是我国大型火电厂集中区, 属于高烈度区, 为满足高烈度区的要求, 需要沿型钢混凝土柱一侧或两侧布置短肢墙来提高主厂房承载力与刚度。目前, 配置短肢墙对型钢混凝土异型节点受力性能、传力机理, 对结构整体抗震性能影响效果研究成果较少。以某大型型钢混凝土结构主厂房为原型<sup>[1]</sup>, 采用 ABAQUS 有限元软件对配置短肢墙型钢混凝土异型边节点进行非线性分析, 研究短肢墙对型钢混凝土异型边节点承载力、延性、刚度与滞回性能的影响, 为其在实际工程应用中提供理论研究基础。

## 1 有限元模型验证

### 1.1 模型设计

基于文献[2]选取三号边节点 (EJ-3) 进行有限元模型验证。根据边节点相关资料, 建立与其足尺寸有限元模型。边节点 EJ-3 试件混凝土强度等级为 C35, 纵筋为 HRB335, 箍筋为 HPB235, 型钢为 Q235, 轴压比为 0.25, 其几何尺寸与配筋参数如表 1。

表 1 配筋参数表  
Tab.1 Reinforcement parameters

EJ-3	$b \times h / \text{mm}^2$	型钢	纵筋	箍筋
上柱	250×240	H140×90×4×6	6 $\Phi$ 12	8@100
下柱	250×280	H180×90×4×6	6 $\Phi$ 12	8@100
节点区	-	-	-	6@120
梁	200×500	H400×60×5×6	4 $\Phi$ 20	10@100

### 1.2 模型选取

(1)模型本构与破坏准则选取

选用 ABAQUS 有限元软件进行节点模拟, 混凝土采用混凝土塑性损伤模型<sup>[5-8]</sup>, 钢筋采用双折线强化

收稿日期: 2014-05-20

修改稿日期: 2014-12-01.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51178383); 国家自然科学基金项目 (51478381); 教育部博士点基金项目 (20136120110004, 20106120120002)

作者简介: 白国良 (1955-), 男, 博士, 教授, 主要从事钢与混凝土组合结构以及工程结构抗震的研究。E-mail: guoliangbai@126.com

模型.

混凝土单轴受拉、受压应力-应变曲线采用 GB50010-2010《混凝土结构设计规范》所建议的公式<sup>[9]</sup>. 钢筋采用双折线强化模型, 第一上升阶段斜率为钢筋的弹性模量  $E_s$ , 第二上升阶段(强化阶段)斜率为弹性模量  $E' = 0.01E_s$ .

混凝土采用多轴应力状态下五参数 Willam&Warnke 准则<sup>[8]</sup>, 钢筋采用 Von Mises 屈服准则<sup>[8]</sup>.

(2)边界条件及加载制度

1) 边界条件

节点模型柱底线位移全部约束, 即柱底铰接; 柱顶平面外线位移进行约束, 防止发生侧向失稳; 梁端平面外线位移与竖向位移进行约束.

2) 加载制度

节点模型采用准静态柱端加载, 加载过程分为两步: 第一步, 对柱顶施加轴向压力; 第二步, 对柱顶施加位移荷载.

1.3 模型验证

(1) 荷载-位移曲线对比

按照上述模型设计参数与加载制度, 经过 ABAQUS 有限元软件分析得到边节点模型荷载-位移曲线. 图 1 为模型荷载-位移曲线与试验荷载-位移曲线对比图.

由图 1 可知, 当边节点处于弹性阶段时, 无论其在正向加载还是在负向加载过程中, 模型荷载-位移曲线与试验荷载-位移曲线基本重合. 当边节点处于塑性阶段时, 模型正向荷载-位移曲线与试验正向荷载-位移曲线发展趋势一致; 但模型负向荷载-位移曲线下降率明显高于试验负向荷载-位移曲线. 其主要原因可解释为: 试验在低周反复加载过程中, 构件节点区受损混凝土开裂裂缝是可以部分闭合的, 这就会造成节点开裂区域部分刚度恢复. 而模型在分析过程中混凝土损伤是持续累加的, 计算机在迭代过程中无法完全考虑裂缝闭合对边节点刚度的影响<sup>[10]</sup>.

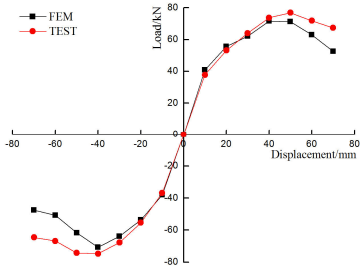


图 1 荷载-位移曲线  
Fig.1 Load-displacement curve

表 2 试验与模型荷载-位移曲线特征点  
Tab.2 The feature points of load-displacement curve between test and model

特征点	TEST	FEM
极限承载力/kN	73.50	71.54
屈服位移/mm	26.32	23.47
极限位移/mm	68.30	65.00

由表 2 可知, 相对于试验荷载-位移曲线各特征点数值, 模型各特征点数值偏小. 其中, 模型极限承载力比试验偏小 2.67 %、屈服位移偏小 10.83 %、极限位移偏小 4.83 %. 以上平均误差为 6.11%, 文献[10]表明平均误差在可接受范围内.

(2) 破坏形态对比



图 2 破坏形态  
Fig.2 Failure mode

由图 2 可知, 试验试件与模型最终破坏形态呈“X”型, 且混凝土损伤区域集中于节点核心区. 所以, 该 ABAQUS 有限元模型可以较好体现试验荷载-位移曲线发展趋势与其相关特征点数值, 可以用来进行该类异型边节点受力机理与抗震性能分析.

2 有限元分析

以模型 EJ-3 为基础,设计 4 个边节点有限模型,其配筋均按国家现行规范设计.边节 YJD-1 无短肢墙约束,边节点 YJD-2 沿其纵向布置短肢墙,边节点 YJD-3 沿其横向布置短肢墙,边节点 YJD-4 沿其纵、横向均布置短肢墙.参考文献<sup>[11]</sup>中墙肢尺寸设计模型短肢墙尺寸,纵墙截面尺寸为 80 mm×175 mm,横墙截面尺寸为 100 mm×320 mm,图 3 为各节点示意图.

2.1 破坏形态分析

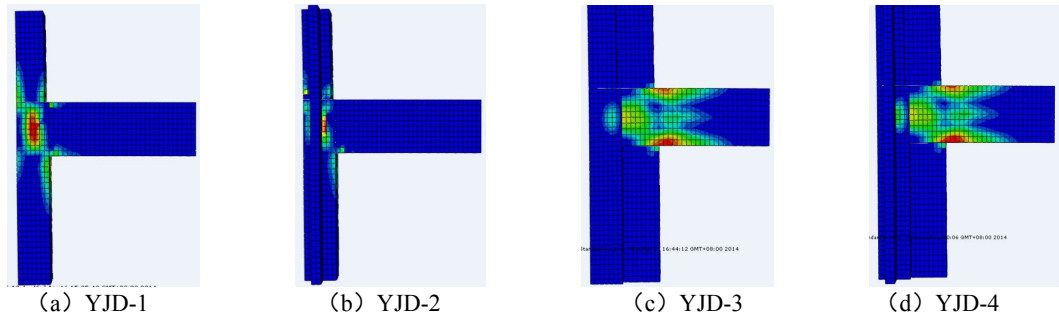


图 3 节点布置示意图  
Fig.3 Schematic diagram of abnormal joint

图 4 节点构件破坏形态  
Fig.4 Failure mode of different joints

图 4 为 4 个边节点模型破坏形态,由其可知边节点 YJD-1 为剪切破坏、边节点 YJD-2 为近梁端塑性铰破坏、边节点 YJD-3 与边节点 YJD-4 为梁端塑性铰破坏.分析可知纵向短肢墙混凝土基本没有存在损伤,而横向短肢墙混凝土出现了部分损伤.这说明纵向短肢墙在异型边节点受力时主要其约束作用,横向短肢墙在异型边节点受力时分担了较大的承载力.

2.2 承载力与延性分析

承载力与延性为结构抗震两个重要的性能指标.表 3 为计算得到的各边节点模型的屈服荷载、极限荷载与延性系数.

表 3 主要模型分析结果  
Tab.3 Main analysis results of FEM

特征点	YJD-1	YJD-2	YJD-3	YJD-4
屈服承载力/kN	57.86	62.84	109.77	110.29
屈服位移/mm	23.47	25.90	15.69	16.22
极限承载力/kN	71.54	76.89	127.15	131.73
极限位移/mm	65.00	75.00	50.00	55.00
延性系数	2.77	2.90	3.19	3.40

由表 3 可知,边节点 YJD-4、边节点 YJD-3 和边节点 YJD-2 屈服承载力,分别比未布置短肢墙边节点 YJD-1 屈服承载力提高了 90.62 %、89.72 %和 8.61 %;极限承载力提高了 84.13 %、77.73 %和 7.48 %;延性系数提高了 22.74 %、15.16 %和 4.69 %.这说明沿型钢混凝土柱纵、横向配置短肢墙可以改善异型边节点承载力与延性.

边节点 YJD-4 屈服承载力与极限承载力分别比 YJD-2 提高了 75.51 %和 71.32 %,延性系数提高了 17.24 %;比节点 YJD-3 提高了 0.47 %和 3.60 %,延性系数提高了 6.58 %.这说明配置横向短肢墙对边节点承载力与延性的影响作用明显强于配置纵向短肢墙.

分析认为这主要是因为横向为异型边节点构件受力方向,当型钢混凝土柱布置横向短肢墙时,节点构件刚度明显增大,因此承载力提高十分显著;而纵向为垂直于边节点构件受力方向,纵向短肢墙的配置对节点有明显的约束作用,延缓了节点区裂缝的出现与发展,因此其延性改善明显.

2.3 滞回性能分析

4 个异型边节点滞回曲线如图 5 所示,分析计算结果可以得到以下结论:

(1) 4 个异型边节点模型滞回曲线均明显反映出节点处于各个受力阶段的受力性能,曲线均存在明显

的下降段.

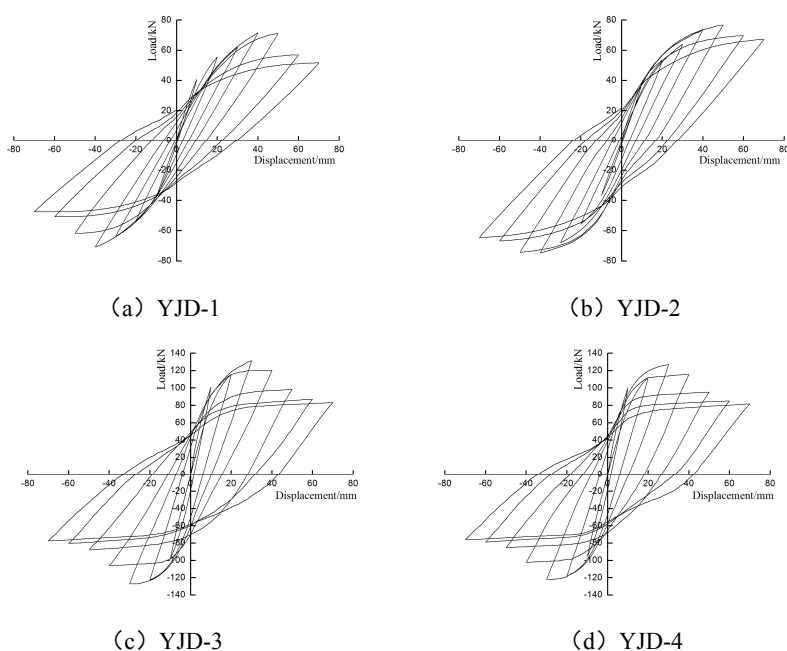


图5 滞回曲线

Fig.5 Hysteretic curve

(2) 边节点 YJD-2 与 YJD-1 相比,在曲线下下降段前者强度退化并不十分明显.由此认为,纵向短肢墙可以有效地避免了该类异型边节点脆性破坏形式.

(3) 边节点 YJD-3 与 YJD-1 相比,前者滞回曲线更为饱满,各个阶段承载力明显高于后者.但是,二者滞回曲线在下降段均存在明显的强度退化.

(4) 对比边节点 YJD-4, YJD-3 与 YJD-1 滞回曲线,短肢墙有效地改善该类异型边节点的滞回性能.纵向短肢墙的配置增大滞回曲线面积,纵向短肢墙在配置横向短肢墙该类异型边节点的基础上也能改善其破坏机制与滞回性能.

骨架曲线为滞回环各峰值点所连接形成的曲线,可以综合反映节点各边节点承载力与变形的关系,是节点抗震性能的综合体现<sup>[12]</sup>.图6为计算得到的各异型边节点骨架曲线.

由图6可知,相对于钢筋混凝土边节点经历弹性阶段、弹性阶段与塑性阶段三个受力过程,型钢混凝土异型边节点受力过程主要分为弹性阶段与塑性阶段.对于边节点 YJD-1 与 YJD-2,边节点 YJD-3 与 YJD-4 骨架曲线存在明显的屈服拐点.

对比边节点 YJD-2 与 YJD-1 骨架曲线,纵向短肢墙明显延长了异型边节点的极限位移,减缓了破坏阶段承载力的降低速度.对比边节点 YJD-3 与 YJD-1 骨架曲线,横向短肢墙明显提高了异型边节点的极限承载力,但也加快了破坏阶段承载力下降速度.

分析认为在有限元分析时,当型钢混凝土柱配置横向短肢墙,混凝土的损伤主要有异型边节点混凝土与横向短肢墙混凝土两部分组成,这就加剧了混凝土损伤积累,使承载力下降速度加快.

## 2.4 刚度退化特性分析

刚度退化为刚度随着循环周数和位移接近极限而减少为刚度退化.节点刚度的具体描述一般采用割线刚度来表示,割线刚度为:

$$K_i = \frac{|+P_i| + |-P_i|}{|+\mu_i| + |-\mu_i|} \quad (1)$$

式中:  $P_i$  为第  $i$  次加载位移时的峰值点荷载值,  $\mu_i$  为第  $i$  次加载位移时的峰值点位移值.

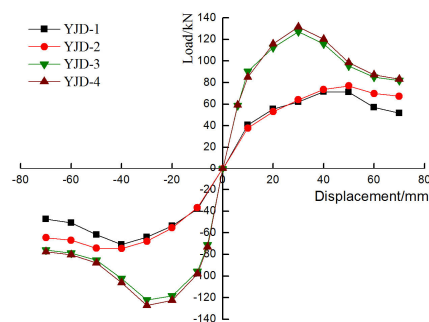


图6 骨架曲线

Fig.6 Skeleton curve

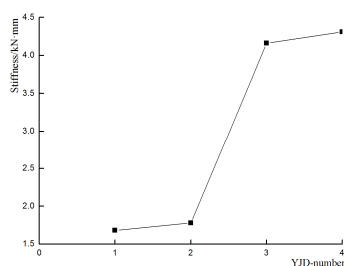


图7 刚度对比

Fig.7 Comparison of stiffness

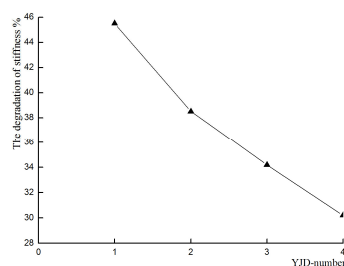


图8 刚度退化率对比

Fig.8 Comparison of stiffness degradation

由图7可得,4个边节点刚度的大小关系为:YJD-4>YJD-3>YJD-2>YJD-1;由图8可得,4个边节点模型退化率的大小关系为:YJD-4<YJD-3<YJD-2<YJD-1.这表明短肢墙对型钢混凝土异型边节点刚度具有改进作用,特别是横向短肢墙对该类异型边节点刚度改进起主要作用.

### 3 结论

在模型验证正确性基础上,通过对配置纵向短肢墙、横向短肢墙与纵横向短肢墙型钢混凝土异型边节点进行非线性分析,研究了短肢墙配置不同方向对型钢混凝土异型节点抗震性能的影响作用,得到以下主要结论:

(1) 沿型钢混凝土柱纵向布置短肢墙可以增大该类异型边节点极限位移与延性,纵向短肢墙对节点区混凝土有明显的约束作用,可以较有效地避免脆性破坏机制出现.

(2) 沿型钢混凝土柱横向布置短肢墙可以显著提高该类异型边节点承载力,改善其刚度及刚度退化率.横向短肢墙提高了该类异型边节点滞回性能,使滞回曲线更为饱满,耗能能力更强,具有良好的抗震性能.

### 参考文献 References

- [1] 白国良,李红星,白涌涛,等.火电厂RC分散剪力墙—SRC框排架滞回性能试验研究与分析[J].土木工程学报,2011,44(8):59-65.  
BAI Guoliang,LI Hongxing,BAI Yongtao,et al. Experimental study and analysis of the hysteretic behavior of the RC scattered shear wall-SRC frame-bent structures for thermal power plant [J]. China Civil Engineering Journal,2011,44(8):59-65.
- [2] 王博,白国良,代慧娟,等.低周反复荷载下强梁弱柱型钢混凝土变柱T型节点力学性能研究[J].土木工程学报,2014,47(3):1-12.  
WANG Bo,BAI Guoliang,DAI Huijuan,et al. Study on mechanic performance of T-tube strong-column weak-beam variable-column SRC joints under low-cyclic reversed loading [J]. China Civil Engineering Journal,2014,47(3):1-12.
- [3] 康灵果.大型火力发电厂少墙型钢混凝土框架主厂房抗震性能试验与设计研究方法[D].西安:西安建筑科技大学,2009.  
KANG Lingguo. Study on seismic performance experiment and design method of the few walls and SRC frame main building in large thermal power plant [D].Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology,2009.
- [4] 李平昌.钢筋混凝土宽梁与薄墙肢节点的初步试验和非线性分析研究[D].重庆:重庆大学,2002.  
LI Pingchang. Preliminary test and nonlinear analysis research on the beam-wider-than wall joint [D]. Chongqing:Chongqing University,2002.
- [5] MARK P.Reinforced Concrete Beams subject to biaxial Shear Forces: strut-and-tie models, experiment and design approach [J].Beton-und Stahlbetonbau,2004,99(9):744-753,2004.
- [6] LUBLINER J,OLIVER J,OLLER S,et al. A plastic-damage model for concrete [J]. Solids Structures,1989,25(3):299-326.
- [7] MARK P. Design of reinforced concrete beams with rectangular cross sections against biaxial shear forces [J].Beton-und Stahlbetonbau,2005,100(5):370-375.
- [8] ABAQUS Analysis User's Manual [M]. USA: ABAQUS, Inc,2007.
- [9] GB50010-2010 混凝土结构设计规范[S].北京:中国建工出版社,2010.  
GB50010-2010 Code for design of concrete structure[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2010.
- [10] 周慧.空间组合节点抗震性能试验研究与理论分析[D].北京:清华大学,2012.  
ZHOU Hui. Experimental and theoretical study on 3D composite joints under bidirectional loading [D]. Beijing:Tsinghua University,2012.
- [11] 傅剑平,都红钢,白绍良.T型截面短肢墙梁中间节点抗震性能试验研究[J].重庆建筑大学学报,2007,29(6):25-30.  
FU Jianping,DU Honggang,BAI Shaoliang. Experiment research on seismic behavior of T shaped short pier shear wall interior joint under cyclic loading [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University,2007,29(6):25-30.
- [12] 王燕,郁有升,王鹏.钢框架梁端翼缘板式加强型节点力学性能试验研究[J].工程力学,2011,28(3):177-184.  
WANG Yan,YU Yousheng,WANG Peng. Experimental study on mechanics property of flange plate-reinforced connections of

steel frames [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(3): 177-184.

## An impact analysis on seismic behavior of steel reinforced concrete abnormal exterior joint with effect of short-limb wall

BAI Guoliang, LI Ruiwen, ZHU Jianing

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** The paper presents the studies on different seismic behavior of steel reinforced concrete (SRC) abnormal exterior joint with short-limb wall at different directions, by concrete damaged plasticity model of ABAQUS, based on the steel reinforced concrete frame main power house. Numerical analysis indicates that the short-limb wall at longitudinal direction can improve the ductility and failure mechanism of the joint, avoiding the failure mechanism at column hinge. The short-limb wall at transverse direction can increase capacity and stiffness of the joint substantially, and decrease the degradation rate of stiffness. The short-limb wall can enlarge the area of hysteretic hoop and improve seismic behavior of the joint.

**Key words:** abnormal exterior joint of SRC; seismic behavior; concrete damaged plasticity model; short-limb wall

(本文编辑 沈波)

(上接第 773 页)

- [11] GB/T 17657-1999 人造板及饰面人造板理化性能试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.  
GB/T 17657-1999 Test methods of evaluating the properties of wood-based panels and surface decorated wood-based panels[S]. Beijing: China Planning Press, 1999.
- [12] 秦雅菲. 冷弯薄壁型钢低层住宅墙柱体系轴压性能理论与试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2005.  
QIN Yafei. Theoretical and experimental research of cold-formed steel residential building wall stud system subject to centric axial loads[D]. Shanghai: Tongji University, 2005.

## Experimental study on shear behavior of screw connections in cold-formed thin-wall steel structures

HAO Jiping<sup>1</sup>, LIU Bin<sup>1</sup>, SHAO Dayu<sup>1</sup>, WANG Yijun<sup>1</sup>, LI Kelong<sup>1</sup>, LI Yuechen<sup>2</sup>

(1 School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Shaanxi Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710018, China)

**Abstract:** In order to investigate the shear behavior of the screw connections between steel and steel, oriented strand boards (OSB) or calcium silicate boards (CSB), a total of 32 specimens of screw connections were tested. The loading process and failure modes were analyzed. The factors such as steel plate thickness, the direction of tension fiber, loading rate and the distance between the center of the screw and the adjacent edge of the sheathing, which influence the shear capacity, were researched. The results indicate that the failure modes of connections between steel and steel are the local compression of screw holes and the shear fracture of screw heads. Screw connections between steel and OSB sheathings happened to the inclination of screws severely and the splitting of the edge of sheathings. The damage phenomena of screw connections between steel and CSB sheathings are the tensile failure of the net section of CSB sheathing on the location of the screw. With the increase of steel plate thickness and the distance between the center of the screw and the adjacent edge of the sheathing, screw connections have larger shear capacity. With the increase of the loading rate, the shear capacity of screw connections between steel and steel or CSB sheathings could be strengthened, but screw connections between steel and OSB sheathings have lower shear strength. Owing to the direction of tension fiber of OSB and CSB sheathings, the perpendicular-to-grain loaded connections may give lower shear capacity compared with the parallel-to-grain loaded connections.

**Key words:** cold-formed thin-wall steel; screw connections; the shear behavior; experimental study; the shear capacity

(本文编辑 桂智刚)