

# 双面叠合剪力墙水平连接节点承载力分析

张文莹<sup>1</sup>, 杨联萍<sup>2,3</sup>, 余少乐<sup>4</sup>, 张其林<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 3. 华东建筑集团股份有限公司, 上海 200011;

4. 中国建筑第八工程局有限公司, 上海 200120)

**摘要:** 通过双面叠合剪力墙水平连接节点在循环剪切荷载作用下的试验, 对界面连接钢筋的应变随剪切荷载的变化规律进行了分析。结果表明, 双面叠合剪力墙水平连接节点界面连接钢筋的应变变化规律和现浇节点相同位置处的界面连接钢筋应变变化规律一致。根据剪切-摩擦理论对双面叠合剪力墙水平连接节点的抗剪机理进行分析, 确定水平连接节点的抗剪承载力由界面混凝土黏结力、界面摩擦力和界面钢筋的销栓力组成, 基于剪切-摩擦理论建立了双面叠合剪力墙水平连接节点的抗剪承载力计算公式。

**关键词:** 双面叠合剪力墙; 水平连接节点; 应变分析; 抗剪承载力

中图分类号: TU375

文献标志码: A

## An Analysis of Shear Capacity on Horizontal Connections of Double-Superimposed Shear Wall

ZHANG Wenyi<sup>1</sup>, YANG Lianping<sup>2,3</sup>, YU Shaole<sup>4</sup>,  
ZHANG Qilin<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Arcplus Group PLC, Shanghai 200011, China; 4. China Construction Eighth Engineering Division Co., Ltd., Shanghai 200135, China)

**Abstract:** The strain of connecting reinforcement versus shear load relationship was analyzed, based on an experimental study of double-superimposed shear wall horizontal connections subjected to reversed cyclic shear deformations combined with vertical loads. The results showed that the variation of connecting reinforcement strain in double-superimposed shear wall horizontal connections were identical with that in cast-in-place horizontal connections. Besides, the shear mechanism of

double-superimposed shear wall horizontal connections was analyzed based on the shear-friction theory. Moreover, the ultimate shear capacity of the double-superimposed shear wall horizontal connections was determined by the bond force at the interface, the interface friction, and the dowel action of shear connecting reinforcement. Furthermore the proposed calculation formula for shear bearing capacity of the double-superimposed shear wall horizontal connection was derived based on the shear-friction theory.

**Key words:** double-superimposed shear wall; horizontal connection; strain analysis; shear capacity

双面叠合剪力墙是从德国引入的一种装配式结构体系。杨联萍等<sup>[1-6]</sup>对双面叠合剪力墙的抗震性能、叠合面受剪破坏模式以及数值模拟方法已有相关的研究。双面叠合剪力墙的水平连接节点由底部预留钢筋和叠合墙体内部竖向分布钢筋间接搭接形成, 是传递荷载的关键部位。张文莹等<sup>[7]</sup>针对双面叠合剪力墙水平连接节点开展了循环往复荷载作用下的抗震性能试验研究。本文在试验基础上, 对水平节点处界面连接钢筋的应变随剪切荷载的变化规律进行分析, 基于剪切摩擦理论对双面叠合剪力墙水平连接节点的抗剪机理进行分析。

## 1 试验概况

本试验共设计制作了6片双面叠合剪力墙水平连接节点试件, 在各试件界面连接钢筋表面粘贴电阻应变片, 量测钢筋在试验过程中的应变。现浇节点中应变片布置位置和双面叠合试件位置相同, 沿

收稿日期: 2019-04-01

基金项目: 上海市科委项目(16DZ2250600); 上海市科委重大课题(14DZ1202100)

第一作者: 张文莹(1987—), 女, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为空间结构、预制装配式结构。

E-mail: wenyinchangan@163.com

通信作者: 余少乐(1987—), 男, 工学博士, 主要研究方向为预制装配式建筑、空间结构、建筑施工。

E-mail: yushaole10@163.com



着钢筋纵向在每个钢筋上布置3个电阻应变片,编号1、2、3号。其中1号应变片位于灌浆层和上部叠合墙体界面位置,2号应变片距离1号应变片100

mm,3号应变片距离2号应变片100 mm,各试件界面连接钢筋表面应变片布置如图1所示。具体的试验结果可参考文献[7]。

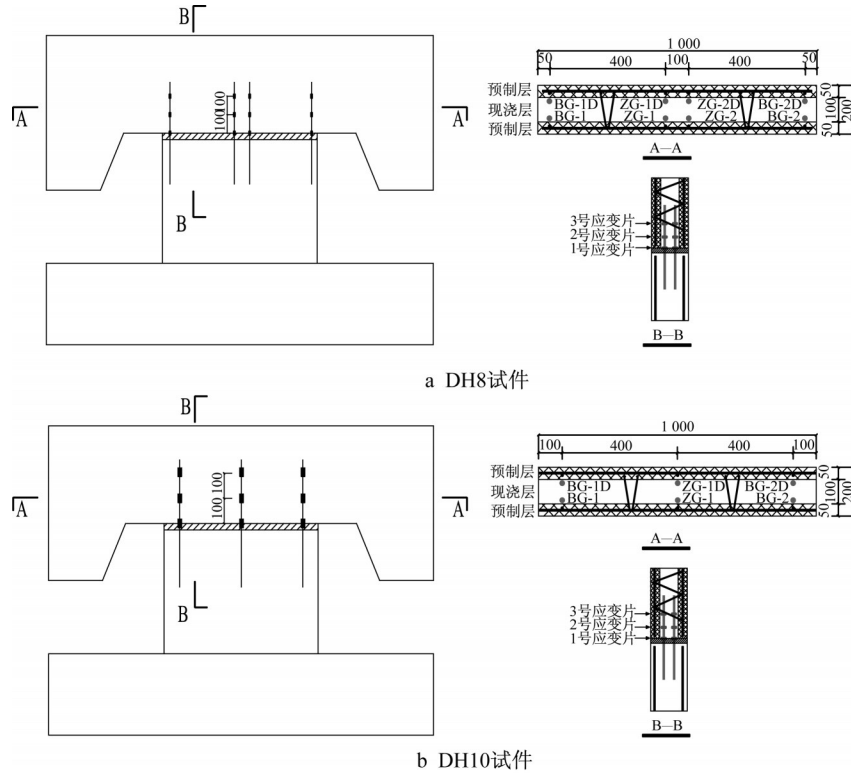


图1 试件测点布置(单位:mm)

Fig.1 Arrangement of testing points (unit:mm)

## 2 界面钢筋应变随荷载的变化规律

### 2.1 DH8-1试件

DH8-1试件界面钢筋的应变随荷载的变化规律如图2所示。从图2中可以看出,界面连接钢筋在同一位置的两根钢筋应变变化规律较为一致,分布在边缘的4根钢筋的应变在正反两个方向加载过程中不对称,而中间4根钢筋的应变在正反两个方向加载过程中较为对称,相同荷载阶段边缘的4根钢筋的应变值比中间4根钢筋的应变值大。将界面连接钢筋在 $\pm 200$  kN、 $\pm 400$  kN、 $\pm 600$  kN、 $\pm 700$  kN(开裂荷载)、第1阶段位移加载第1循环峰值阶段(783 kN/—766 kN)、试件的峰值荷载阶段 $P_v^+/P_v^-$ (831 kN/—719 kN)对应的应变值提出,绘制成图3。从图3中可以看出,在开裂荷载之前,所有钢筋的应变值都非常小,均不超过 $100 \times 10^{-6}$ ,表明在开裂之前界面钢筋的抗剪作用较小;在开裂荷载阶段,两侧钢筋应变值增加明显,靠近东侧反力架的钢筋BG-2应变值达到屈

服应变,BG-2D的应变值达到0.011,而中间4根钢筋的应变值仍然较小;在峰值荷载阶段,只有界面连接钢筋BG-2D超过屈服应变,达到0.035,其余钢筋没有达到屈服。从图3中可以看出,随着荷载的增加,中间4根钢筋的应变值逐渐增大,两侧钢筋的应变在开裂荷载阶段突然增大,随着荷载增加缓慢下降,表明界面连接钢筋逐渐均匀受力。

### 2.2 XJ8试件

XJ8试件界面钢筋的应变变化规律如图4所示。从图4中可以看出,界面连接钢筋变化规律和双面叠合DH8-1试件界面钢筋应变变化规律一致。将界面连接钢筋在 $\pm 200$  kN、 $\pm 400$  kN、 $\pm 600$  kN、 $\pm 700$  kN(开裂荷载)、第1阶段位移加载第1循环峰值阶段(840 kN/—748 kN)、试件的峰值阶段 $P_v^+/P_v^-$ (857 kN/—752 kN)对应的应变值提出,绘制成图5。从图5中可以看出,在加载至开裂荷载( $\pm 700$  kN)之前,所有钢筋的应变值都非常小,均不超过 $100 \times 10^{-6}$ ,表明在开裂之前界面钢筋的

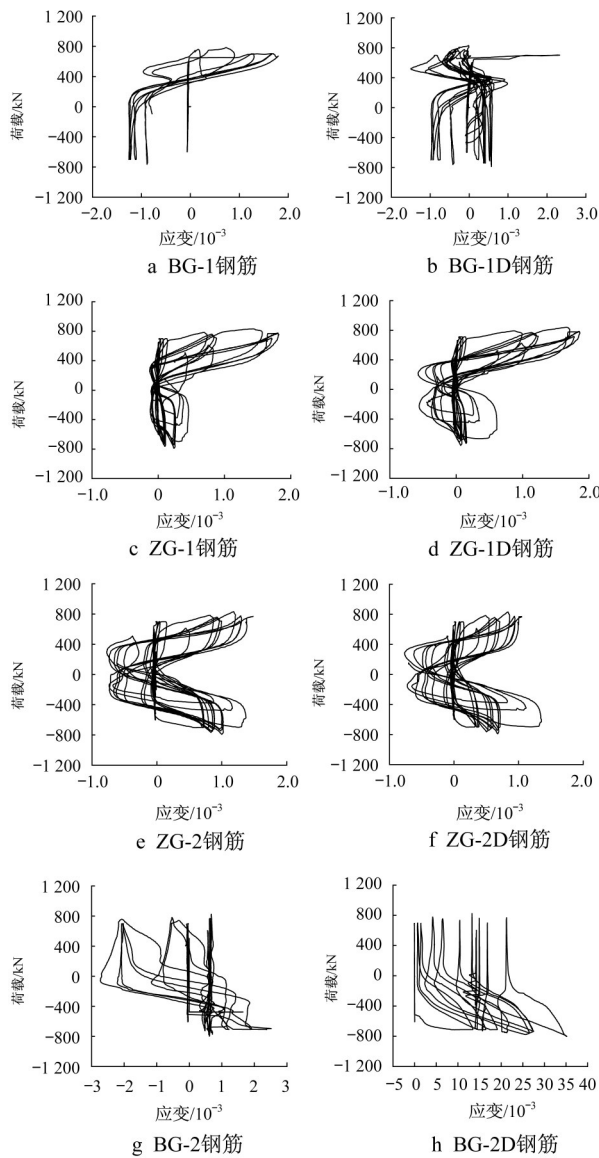


图2 DH8-1试件钢筋应变随荷载变化

Fig.2 Lateral load versus the steel strain of DH8-1

抗剪作用较小;在开裂荷载阶段,两侧钢筋应变值增加明显;在第1阶段位移加载第1循环峰值阶段,所有界面钢筋的应变值进一步的增加,在试件峰值荷载阶段正向峰值时只有界面连接钢筋BG-1应变值达到屈服应变,其余钢筋没有屈服。从图5中可以看出,随着荷载的增加,中间4根钢筋的应变值逐渐增大,两侧钢筋的应变在开裂阶段突然增大,随着荷载增加,边缘钢筋的应变值缓慢下降,表明界面连接钢筋逐渐均匀受力。

### 2.3 DH10-2试件

DH10-2试件界面钢筋的应变变化规律如图6所示。从图6中可以看出,界面连接钢筋在同一位置的两根钢筋应变变化规律较为一致,分布在边缘

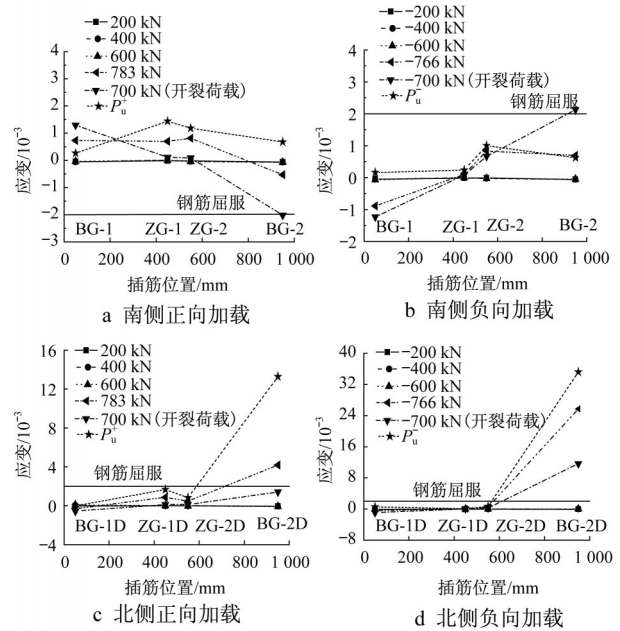


图3 DH8-1试件界面连接钢筋峰值荷载阶段对应的应变变化规律

Fig.3 Peak load at different load stages versus the steel strain of DH8-1

的钢筋应变在正反两个方向加载过程中不对称,而中间两根钢筋的应变在正反两个方向加载过程中较为对称,相同荷载阶段边缘钢筋的应变值比中间两根钢筋的应变值大。将界面连接钢筋在±200 kN、±400 kN、±600 kN(开裂荷载)、第1阶段位移加载第1循环峰值阶段(713 kN/−670 kN)、第2阶段位移加载第1循环峰值阶段(760 kN/−759 kN)、试件的峰值阶段 $P_u^+/P_u^-$ (806 kN/−824 kN)对应的应变值提出,绘制成图7。从图7中可以看出,在开裂荷载之前,所有钢筋的应变值都非常小,表明在开裂前界面钢筋的抗剪作用较小;在开裂荷载阶段,BG-1和BG-1D应变值增加明显,在+600 kN时,BG-1D钢筋应变值超过屈服应变;在第1阶段位移加载第1循环正向峰值阶段,BG-1和BG-1D钢筋应变值超过屈服应变,负向加载阶段BG-2和BG-2D钢筋应变值超过屈服应变;在第2阶段位移加载第1循环正向峰值阶段,BG-1钢筋应变值继续增大,负向加载阶段BG-2D钢筋应变值超过0.016,进入强化阶段,而BG-2钢筋应变减小;在试件峰值荷载阶段,正向峰值时界面连接钢筋BG-1、ZG-1、BG-2D应变值超过屈服应变,负向峰值时界面连接钢筋BG-1、ZG-1、BG-2D应变值超过屈服应变。从图7中可以看出,随着荷载的增加,中间两根钢筋的应变值逐渐增大,在极限荷载时,ZG-1应变超过屈服

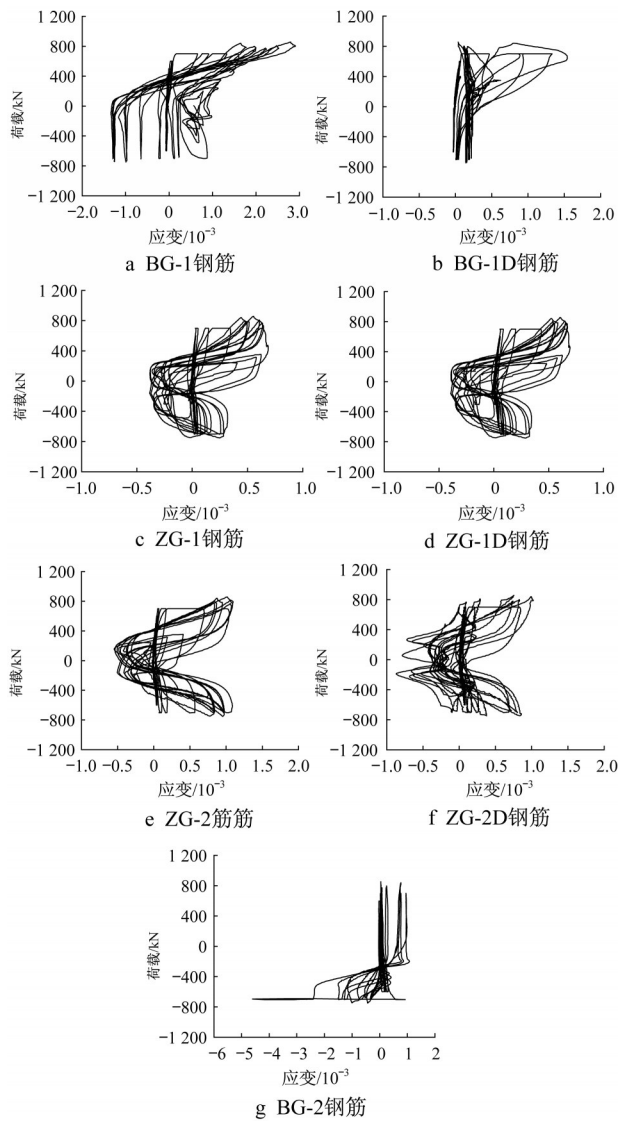


图4 XJ8试件钢筋应变

Fig.4 Lateral load versus the steel strain of XJ8

服应变,两侧钢筋的应变也随着荷载的增加而增大。

2.4 XJ10试件

XJ10试件界面钢筋的应变变化规律如图8所示。从图8中可以看出,其变化规律和双面叠合DH10-2试件界面钢筋应变变化规律一致。将界面连接钢筋在±200 kN、±400 kN、±600 kN(开裂荷载)、第1阶段位移加载第1循环峰值阶段(731 kN/−675 kN)、第2阶段位移加载第1循环峰值阶段(732 kN/−816kN)、试件的峰值阶段 $P_u^+/P_u^-$ (773 kN/−820 kN)对应的应变值提出,绘制成图9。从图9中可以看出,在开裂之前界面钢筋的抗剪作用较小;在开裂荷载阶段,钢筋BG-2应变值增加明显;在第1阶段位移加载的第1循环正向峰值阶段,BG-1应变值增加明显,负向加载阶段,BG

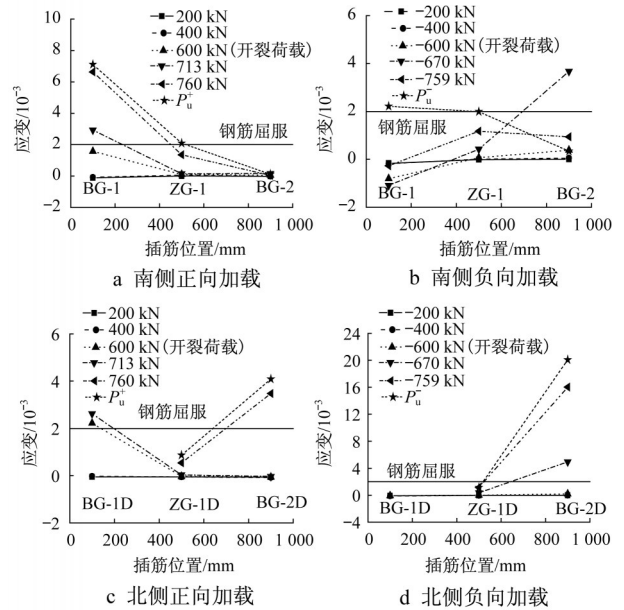


图5 XJ8试件界面连接钢筋峰值荷载阶段对应的应变变化规律

Fig.5 Peak load at different load stages versus the steel strain of XJ8

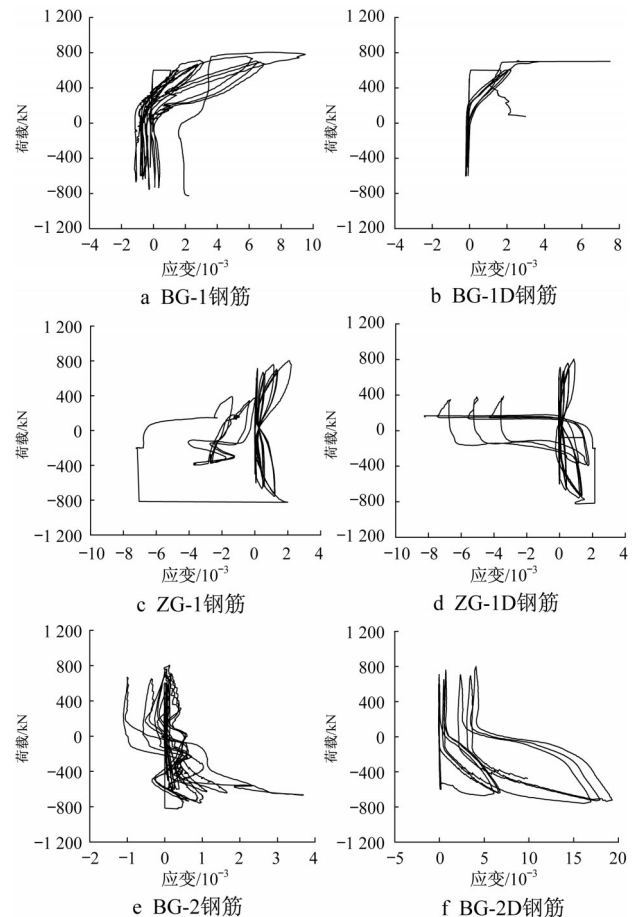


图6 DH10-2试件钢筋应变

Fig.6 Lateral load versus the steel strain of DH10-2

-2钢筋应变值超过屈服应变;在第2阶段位移加载的第1循环正向峰值阶段,钢筋应变值进一步增大,但没有达到屈服应变,在负向峰值阶段,BG-2钢筋应变值超过屈服应变;在试件峰值荷载阶段正向峰值时,界面连接钢筋BG-1和BG-2应变值超过屈服应变,负向峰值时,界面连接钢筋BG-2应变值超过屈服应变。从图9中可以看出,中间钢筋的应变值随着荷载的增加逐渐增大,但最大应变值没有超过屈服应变,两侧钢筋的应变也随着荷载的增加而增大。

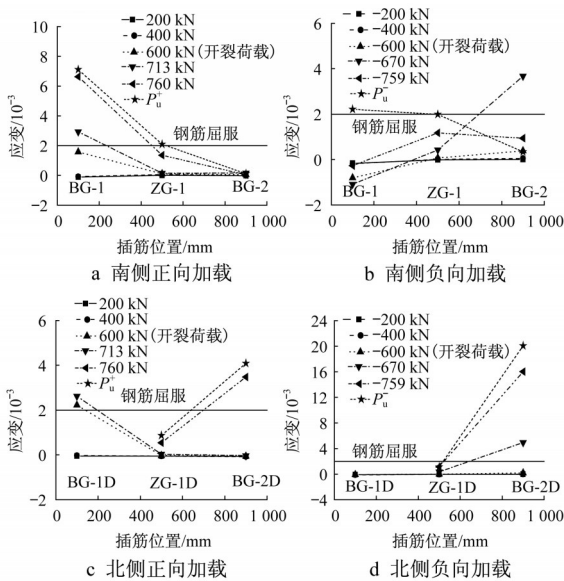


图7 DH10-2试件界面连接钢筋峰值荷载阶段对应的应变变化规律

Fig.7 Peak load at different load stages versus the steel strain of DH10-2

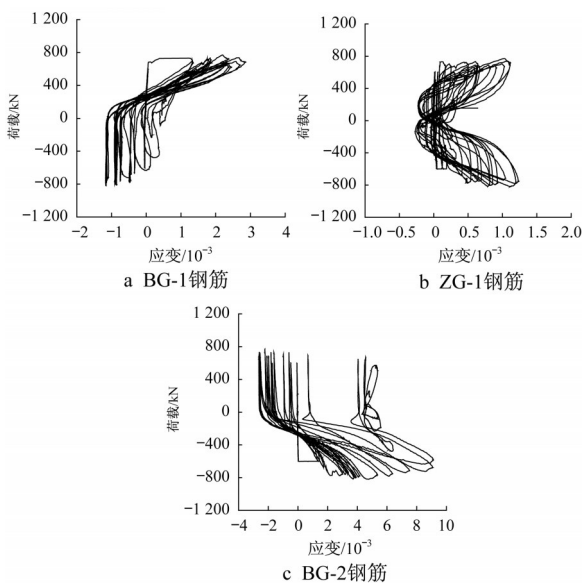


图8 XJ10试件界面钢筋应变随水平荷载的变化关系  
Fig.8 Lateral load versus the steel strain of XJ10

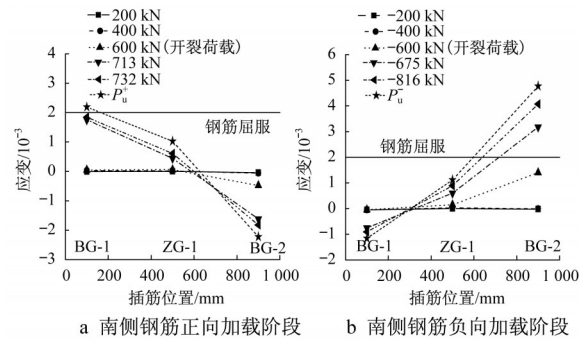


图9 XJ10试件试件界面连接钢筋峰值荷载阶段对应的应变变化规律

Fig.9 Peak load at different load stages versus the steel strain of XJ10

从以上分析可以看出:节点连接钢筋采用8 mm 螺纹钢的双面叠合DH8试件和现浇XJ8试件界面连接钢筋应变变化规律较为一致,随着荷载的增加,中间4根钢筋的应变值逐渐增大,边缘钢筋的应变值在开裂阶段增加较为明显,之后,随着位移的增大,应变值先增大后降低,界面钢筋应变值逐渐趋于均匀;峰值荷载阶段,双面叠合DH8试件和现浇XJ8试件的界面连接钢筋大部分未屈服,仅边缘钢筋应变值达到屈服应变。双面叠合DH10试件和现浇XJ10试件的界面连接钢筋应变变化规律较为一致:随着荷载的增加,中间两根钢筋的应变值逐渐增大,边缘钢筋的应变值在开裂阶段增加较为明显,之后,随着位移的增大,应变值也逐渐增大;峰值荷载阶段,双面叠合DH10试件和现浇XJ10试件的界面连接钢筋边缘4根钢筋应变值均能达到屈服,中间2根界面连接钢筋的应变值没有达到屈服,但应变值接近屈服应变。

### 3 水平节点抗剪机理分析

双面叠合剪力墙水平连接节点界面抗剪承载力V根据剪切-摩擦理论可以分成3个部分:界面钢筋的销栓力 $V_{sr}$ 、界面摩擦力 $V_f$ (其中包括界面连接钢筋受拉产生的界面摩擦力 $V_{fs}$ 和界面受法向压应力产生界面摩擦力 $V_{fg}$ )和新老混凝土间的黏结力 $V_{adh}$ ,如式1所示。

$$V = V_{adh} + V_{sr} + V_f \quad (1)$$

首先利用应变片测得的钢筋的应变值,计算剪切钢筋受拉产生界面摩擦力 $V_{fs}$ 、钢筋的销栓作用 $V_{sr}$ 随水平荷载的变化规律,并根据剪切-摩擦理论计算法向压力产生界面摩擦力 $V_{fg}$ 随水平荷载的变化规律,最后利用总荷载减去 $V_{sr}$ 、 $V_{fs}$ 和 $V_{fg}$ ,得到黏

结力  $V_{\text{ach}}$  随水平荷载的变化规律。

### 3.1 界面摩擦力 $V_{\text{fs}}$ 随水平荷载的变化规律

界面连接钢筋受拉产生的界面摩擦力  $V_{\text{fs}}$  如式2所示。

$$V_{\text{fs}} = \mu F_s \sin \alpha \quad (2)$$

式中:  $F_s$  为钢筋受到的拉力;  $\mu$  为界面摩擦系数, 在试件制作过程中, 对新老混凝土交界面进行了粗糙处理, 参考欧洲和北美规范中关于  $\mu$  取值的相关规定, 对未经处理的老混凝土界面, 界面摩擦系数取 0.6, 对经过刻痕处理的老混凝土界面, 界面摩擦系数取 1.0, 因此文中界面摩擦系数取 1.0;  $\alpha$  为剪切钢筋和剪切面的角度(试验中  $\alpha=90^\circ$ )。试验结果表明, 在峰值荷载时, 界面连接钢筋受拉未屈服, 因此钢筋提供的拉力  $F_s$  如式3所示。

$$F_s = n A_s f_s \quad (3)$$

式中:  $f_s$  为钢筋拉应力;  $n$  为界面钢筋根数;  $A_s$  为钢筋面积。

根据公式(2)和(3), 可以得出 DH8/XJ8 试件和 DH10/XJ10 试件在各个加载阶段峰值荷载时刻的界面摩擦力  $V_{\text{fs}}$  随水平荷载的变化规律, 分别如图10、11所示。从图10、11中可以看出, 水平荷载达到峰值时, 双面叠合 DH8 试件界面摩擦力的大小和现浇 XJ8 试件界面摩擦力几乎一致, 二者的变化规律也相同; 双面叠合 DH10 试件界面摩擦力的大小和现浇 XJ10 试件界面摩擦力几乎一致, 二者的变化规律也相同。

### 3.2 钢筋销栓作用 $V_{\text{sr}}$ 随水平荷载的变化规律

双面叠合试件中界面连接钢筋的销栓作用破坏模式以钢筋屈服和混凝土压碎的耦合破坏为主。针

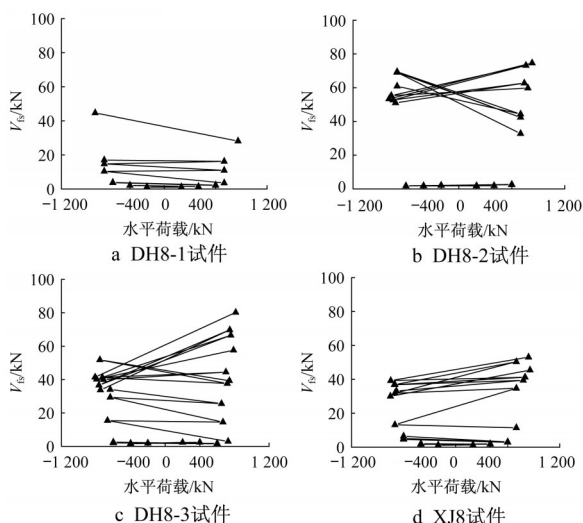


图10 DH8/XJ8试件界面摩擦力随水平荷载变化规律

Fig.10 Interface friction versus the lateral load of DH8/XJ8

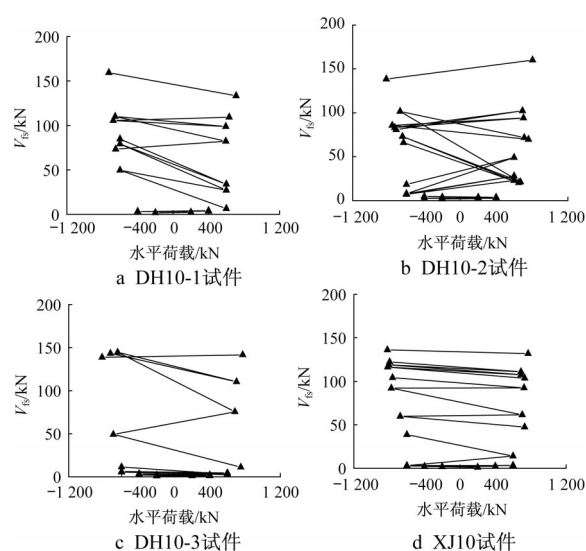


图11 DH10/XJ10试件界面摩擦力随水平荷载变化规律

Fig.11 Interface friction versus the lateral load of DH10/XJ10

对钢筋屈服和混凝土压碎的耦合破坏模式分析, 目前主要采用基于弹性地基梁理论提出的计算模型。分析表明, 钢筋的销栓作用和混凝土的抗压强度、钢筋直径、钢筋锚固深度等因素有关。

(1) Rasmussen<sup>[8]</sup>根据施工缝的位移状态提出了2种计算销栓作用的公式。

当施工缝完全闭合时, 按照式(4)计算。

$$V_{\text{sr}} = 1.3 d^2 \sqrt{f'_c f_y} \quad (4)$$

式中:  $f'_c$  为混凝土的圆柱体抗压强度, 根据文献[9]的建议,  $f'_c = [0.76 + 0.2 \lg(f_{\text{cu}}/19.586)]$ ,  $f_{\text{cu}}$  为混凝土立方体抗压强度;  $f_y$  为钢筋屈服强度;  $d$  为钢筋直径。

当施工缝的法向张开位移为  $e$  (mm) 时, 按照式(5)计算。

$$V_{\text{sr}} = 1.3 \left[ \sqrt{1 + (1.3\epsilon)^2} - 1.3\epsilon \right] d^2 \sqrt{f'_c f_y} \quad (5)$$

式中:  $\epsilon = 3 \frac{e}{d} \sqrt{\frac{f'_c}{f_y}}$ , 用来表示施工缝法向张开位移对承载性能的影响。

(2) Dulacska<sup>[10]</sup>根据试验结果, 提出计算钢筋销栓作用的公式, 如式(6)所示。

$$V_{\text{sr}} = 1.27 d^2 \sqrt{f'_c f_y} \quad (6)$$

Rasmussen 和 Dulacska 提出的公式计算差别较小, 按照式(4)计算界面连接钢筋销栓作用力, 可以得出 DH8/XJ8 试件和 DH10/XJ10 试件在各个加载阶段峰值荷载时刻的钢筋销栓作用力  $V_{\text{sr}}$  随水平荷载的变化规律, 分别如图12、13所示。从图12、13中

可以看出,双面叠合DH8试件界面连接钢筋的销栓作用的变化规律和现浇XJ8试件界面连接钢筋的销栓作用一致,在水平荷载达到峰值时,DH8试件和XJ8试件界面钢筋的销栓作用力几乎相同;双面叠合DH10试件界面连接钢筋的销栓作用的变化规律和现浇XJ10试件界面连接钢筋一致,在水平荷载达到峰值时,DH10试件和XJ10试件界面钢筋的销栓作用力几乎相同。

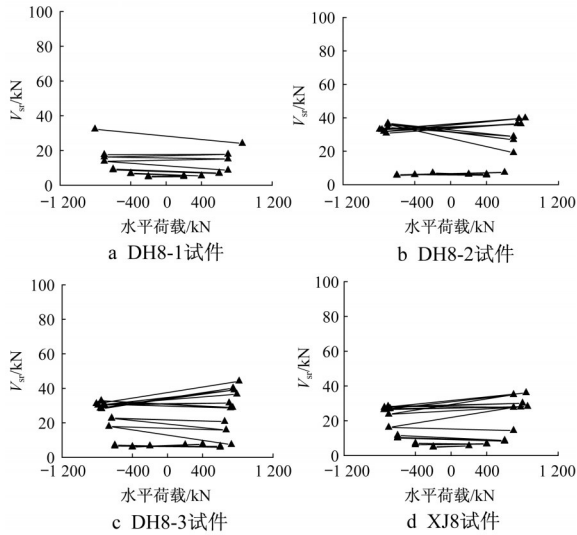


图12 DH8和XJ8试件钢筋销栓力随水平荷载的变化规律  
Fig.12 Dowel action versus the lateral load of DH8/XJ8

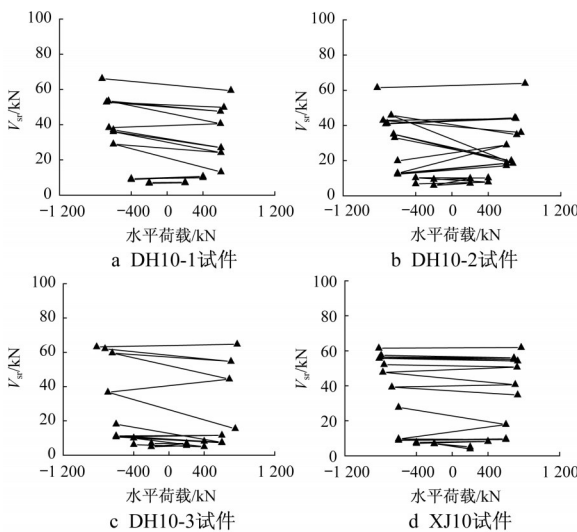


图13 DH10和XJ10试件钢筋销栓力随水平荷载的变化规律  
Fig.13 Dowel action versus the lateral load of DH10/XJ10

### 3.3 竖向荷载产生的界面摩擦力 $V_{fg}$ 随水平荷载的变化规律

由于界面受法向压力  $N$ ,由法向压力  $N$  产生的

界面摩擦力  $V_{fg}$  和界面摩擦系数  $\mu$  有关。 $\mu$  取1.0,即  $V_{fg} = N$ 。由于压力  $N$  是恒定的,因此  $V_{fg}$  也是恒定不变的。

### 3.4 新老混凝土界面黏结力 $V_{adh}$ 随水平荷载的变化规律

新老混凝土界面黏结力  $V_{adh}$  如式(7)所示。

$$V_{adh} = V - (V_{sr} + V_{fs} + V_{fg}) \quad (7)$$

DH8/XJ8试件和DH10/XJ10试件在各个加载阶段峰值荷载时刻的界面黏结力  $V_{adh}$  随水平荷载的变化规律分别如图14、15所示。从图14、15中可以看出,双面叠合DH8试件界面黏结力的变化规律和现浇XJ8试件界面黏结力变化规律一致,二者在水平荷载达到峰值时界面黏结力大小相差很小。双面叠合DH10试件界面黏结力的变化规律和现浇XJ10试件界面黏结力变化规律一致,二者在水平荷载达到峰值时界面黏结力大小相差很小。

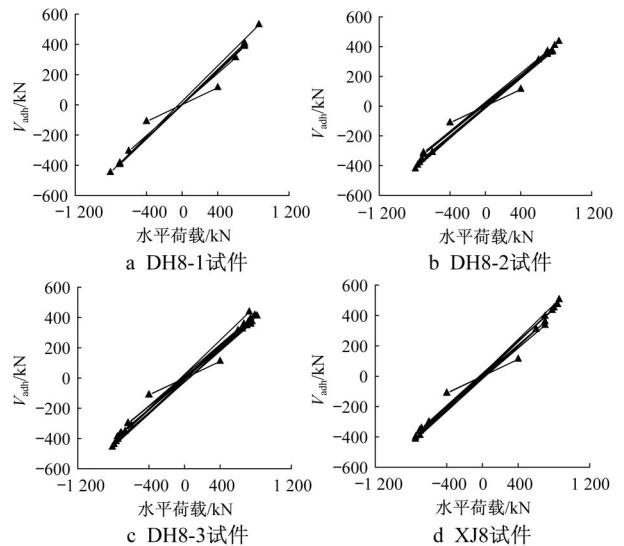


图14 DH8试件和XJ8试件界面黏结力随水平荷载的变化规律

Fig.14 Interface bond force versus the lateral load of DH8/XJ8

### 3.5 基于剪切-摩擦理论的抗剪承载力计算公式

#### 3.5.1 界面钢筋应力的确定

参考文献[7],DH8试件界面连接钢筋的应力值为  $0.4f_y$ ,DH10试件界面连接钢筋的应力值为  $0.8f_y$ ,利用式(2)计算的界面摩擦力  $V_{fs,calc}$  和钢筋销栓力  $V_{sr,calc}$  与试验值对比如表1所示。

#### 3.5.2 新老混凝土界面黏结力的确定

参考文献[7],界面黏结力的计算公式可以归结如式(8)和(9)所示。

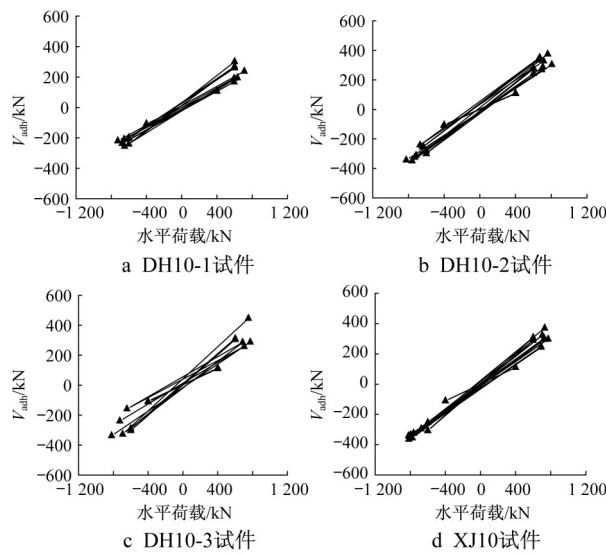


图15 DH10试件和XJ10试件界面黏结力随水平荷载的变化规律

Fig.15 Interface bond force versus the lateral load of DH10/XJ10

$$V_{adh} = 0.8f_t A \quad (\text{DH8试件}) \quad (8)$$

$$V_{adh} = 0.4f_t A \quad (\text{DH10试件}) \quad (9)$$

式中:  $A$  为水平截面面积(1 000 mm×200 mm), 计算值和试验值的对比如表2所示。

3.5.3 抗剪承载力计算公式

DH8试件和DH10试件水平连接节点的抗剪承载力计算公式分别如式(10)和式(11)所示。

$$V = 0.8f_t A + \mu(0.4f_y A_s + N) + 1.3d^2 \sqrt{0.4f_y f_c'} \quad (\text{DH8构件}) \quad (10)$$

$$V = 0.4f_t A + \mu(0.8f_y A_s + N) + 1.3d^2 \sqrt{0.8f_y f_c'} \quad (\text{DH10构件}) \quad (11)$$

为了使公式便于应用, 较为保守地认为, DH8试件的界面黏结力系数为0.4, DH10试件钢筋平均应力为 $0.4f_y$ , 因此可以将公式统一表示为式(12)。计算结果和试验结果(正反方向的较小值)的对比如表3所示。

表1 界面摩擦力和销栓力计算结果对比

Tab. 1 Comparison of calculated and experimental results with respect to interface friction and dowel action

试件编号	加载方向	$V_{fs,calc}/kN$	$V_{fs}/kN$	$V_{fs,calc}/V_{fs}$	$V_{sr,calc}/kN$	$V_{sr}/kN$	$V_{sr,calc}/V_{sr}$
DH8-1	正向	80.0	28.1	2.85	49.1	28.5	1.72
	负向	80.0	44.6	1.79	49.1	38.2	1.29
DH8-2	正向	80.0	76.6	1.04	49.1	47.2	1.04
	负向	80.0	55.5	1.44	49.1	39.1	1.26
DH8-3	正向	80.0	80.2	1.00	49.1	52.1	0.94
	负向	80.0	41.4	1.93	49.1	36.7	1.34
DH10-1	正向	186.1	133.3	1.40	81.1	70.2	1.16
	负向	186.1	159.4	1.17	81.1	78.2	1.04
DH10-2	正向	186.1	160.1	1.16	81.1	75.5	1.07
	负向	186.1	138.4	1.34	81.1	72.6	1.12
DH10-3	正向	186.1	141.6	1.31	81.1	76.5	1.06
	负向	186.1	138.7	1.34	81.1	74.6	1.09

表2 新老混凝土界面黏结力计算值和试验值对比

Tab. 2 Comparison of calculated and experimental results with respect to interface bond force

试件编号	加载方向	黏结力/kN		计算值/试验值	试件编号	加载方向	黏结力/kN		计算值/试验值
		计算值	试验值				计算值	试验值	
DH8-1	正向	390.4	524.8	0.74	DH10-1	正向	195.2	226.3	0.86
	负向	390.4	442.7	0.88		负向	195.2	208.2	0.94
DH8-2	正向	390.4	427.1	0.91	DH10-2	正向	195.2	290.4	0.67
	负向	390.4	416.9	0.94		负向	195.2	333.2	0.59
DH8-3	正向	390.4	401.7	0.97	DH10-3	正向	195.2	274.9	0.71
	负向	390.4	452.6	0.86		负向	195.2	326.5	0.60

由表3可知, DH8试件的计算值和试验值最大误差为23%, DH10试件的计算值和试验值最大误差为22%。

$$V = 0.4f_t A + \mu(0.4f_y A_s + N) + 1.3d^2 \sqrt{0.4f_y f_c'} \quad (12)$$



表3 简化公式抗剪承载力计算值和试验值对比

Tab. 3 Comparison of calculated and experimental results with respect to bearing capacity using simplified formula

试件编号	抗剪承载力/kN		计算值/试验值	试件编号	抗剪承载力/kN		计算值/试验值
	计算值	试验值			计算值	试验值	
DH8-1	622.3	805.5	0.77	DH10-1	627.9	709.7	0.88
DH8-2	622.3	791.5	0.79	DH10-2	627.9	806	0.78
DH8-3	622.3	810.7	0.77	DH10-3	627.9	773	0.81
平均值	622.3	802.6	0.78	平均值	627.9	762.9	0.82

## 4 结论

(1) 双面叠合DH8/DH10试件和现浇XJ8/XJ10试件界面连接钢筋应变变化规律较为一致:随着荷载的增加,中间钢筋的应变值逐渐增大,边缘钢筋的应变值在开裂阶段增加较为明显,之后,随着位移的增大,应变值先增大后降低,界面钢筋应变值逐渐趋于均匀。

(2) 双面叠合DH8/DH10试件界面摩擦力随水平荷载的变化规律和现浇XJ8/XJ10试件变化规律一致,摩擦力的大小也几乎相同;双面叠合DH8/DH10试件界面连接钢筋的销栓作用的变化规律和现浇XJ8/XJ10试件界面连接钢筋的销栓作用一致,在水平荷载达到峰值时,DH8/DH10试件和XJ8/XJ10试件界面钢筋的销栓作用力几乎相同;双面叠合DH8/DH10试件界面黏结力的变化规律和现浇XJ8/XJ10试件界面黏结力变化规律一致,二者在水平荷载达到峰值时界面黏结力大小相差很小。

(3) 基于剪切-摩擦理论建立双面叠合剪力墙水平连接节点抗剪承载力计算公式,理论公式计算值和试验值吻合较好。

## 参考文献:

[1] 杨联萍,余少乐,张其林,等. 双面叠合试件界面抗剪性能试验[J]. 同济大学学报(自然科学版),2017,45(5):664.  
YANG Lianping, YU Shaole, ZHANG Qilin, *et al.* Experimental study on shearing performances of adhesive interface of double-superimposed specimens [J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2017,45(5):664.

[2] 杨联萍,余少乐,张其林,等. 双面叠合剪力墙界面受力性能研究[J]. 建筑结构,2017,47(12):89.  
YANG Lianping, YU Shaole, ZHANG Qilin, *et al.* Mechanical behavior of the interface of the double-superimposed shear walls [J]. Building Structure, 2017, 47(12):89.

[3] 杨联萍,余少乐,张其林,等. 叠合剪力墙结构研究现状和关键问题[J]. 建筑结构,2017,47(12):78.  
YANG Lianping, YU Shaole, ZHANG Qilin, *et al.* Research status quo and key issues in superimposed shear wall structure [J]. Building Structure, 2017,47(12):78.

[4] 杨联萍,余少乐,张其林,等. 不同轴压比下叠合板式剪力墙结构抗震性能分析[J]. 振动与冲击, 2016,35(9):227.  
YANG Lianping, YU Shaole, ZHANG Qilin, *et al.* Seismic behavior research of the superimposed shear walls under different axial-load ratios [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016,35(9):227.

[5] 余少乐,杨联萍,张其林,等. 叠合板式剪力墙滞回性能的有限元分析[J]. 工业建筑, 2016,46(12):43.  
YU Shaole, YANG Lianping, ZHANG Qilin, *et al.* Finite element analysis on hysteretic behavior of superimposed slab shear wall [J]. Industrial Construction, 2016,46(12):43.

[6] 杨联萍,余少乐,张其林,等. 叠合面对叠合剪力墙极限承载力影响的数值分析[J]. 同济大学学报(自然科学版),2016,44(12):1810.  
YANG Lianping, YU Shaole, ZHANG Qilin, *et al.* Numerical analysis to the adhesive interface effects to ultimate bearing capacity of superimposed shear walls [J]. Journal of Tongji University(Natural Science),2016,44(12):1810.

[7] 张文莹,杨联萍,余少乐,等. 双面叠合剪力墙关键问题研究:水平连接节点抗震性能试验[J]. 土木工程学报,2018,51(12):28.  
ZHANG Wenying, YANG Lianping, YU Shaole, *et al.* Research on key issues of the double-superimposed shear wall: experimental study on seismic performance of horizontal connections [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(12):28.

[8] RASMUSSEN B H. The carrying capacity of transversely loaded bolts and dowels embedded in concrete [J]. Bygningstatiske Meddelelser, 1963, 34(2): 39.

[9] 苏小卒. 钢筋混凝土梁抗剪的一种机理[J]. 福州大学学报:自然科学版, 1996,24(S1): 99.  
SU Xiaozu. The shear mechanism of RC beam [J]. Journal of Fuzhou University(Natural Science), 1996,24(S1): 99.

[10] DULACSKA H. Dowel action of reinforcement crossing cracks in concrete [J]. ACI Journal, 1972,69(12): 754.