

# 界面构造对预制混凝土柱接缝抗剪性能的影响研究

刘博研, 薛伟辰, 孙哲

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 开展了4个轴压比为0.4的预制混凝土柱接缝的抗剪试验, 研究了界面构造(凿毛注浆、齿槽注浆、光面注浆、凿毛叠合)对接缝抗剪性能的影响。凿毛注浆和凿毛叠合界面的凹凸深度约6 mm; 齿槽注浆界面的齿槽深度约20 mm; 光面注浆界面的凹凸深度小于2 mm。试验结果表明: 接缝试件均发生剪切破坏; 试件的荷载-滑移曲线可分为弹性、滑移、极限和破坏四个阶段; 叠合接缝的抗剪刚度为注浆接缝的6.02~6.76倍; 各注浆接缝的抗剪刚度接近, 相差不超过10.9%; 叠合接缝的抗剪承载力为注浆接缝的1.38~1.85倍; 齿槽注浆、凿毛注浆接缝的抗剪承载力分别比光面注浆接缝高33.5%和14.9%; 提高界面粗糙度或设置齿槽可增强接缝的抗剪性能。基于试验结果和以往文献中的试验数据, 分析了现有接缝抗剪承载力计算方法的适用性。发现现行规范中计算方法对凿毛叠合和齿槽注浆接缝的计算结果大多过于保守, 对凿毛注浆和光面注浆接缝的部分计算结果偏于不安全。根据试验数据 and 对比结果, 提出了考虑界面构造影响的预制混凝土柱接缝抗剪承载力计算方法。

**关键词:** 预制混凝土柱; 接缝; 界面构造; 抗剪性能; 计算方法

中图分类号: TU398+.9

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)02-0164-10

## Influence of interface structures on shear performance of precast concrete column joints

LIU Boyan, XUE Weichen, SUN Zhe

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 20092, China)

**Abstract:** Shear tests were conducted on four precast concrete column joint specimens under the axial compression ratio of 0.4 in order to investigate the influence of interface structures on their shear performance. Four specimens had different types of joints, including the grouting joint with rough interface, the grouting joint with shear keys, the grouting joint with smooth interface and the composite joint with rough interface. The depths of the rough interface, shear keys and smooth surface were approximately 6 mm, 20 mm and less than 2 mm, respectively. Results demonstrated that all specimens failed in shear mode. The load-slip curves of the specimens could be divided into four stages, namely the elastic stage, the slipping stage, the ultimate stage and the failure stage. The shear stiffness of the composite joints was 6.02~6.76 times that of the grouting joints. The shear stiffness of three grouting joints was similar, and the difference was no more than 10.9%. The shear resistance capacity of the composite joints was 1.35~1.85 times that of the grouting joints. And these of the grouting joints with rough interface and shear keys were 33.5% and 14.9% higher than that of the grouting joints with smooth surface. It was concluded that the rough interface and shear keys led to superior shear performance. Based on the test results and the data from the existing research, the analysis was conducted on the applicability of the existing calculation methods for shear resistance capacity of joints. It was found that most existing methods gave conservative results for the grouting joints with shear keys and the composite joints with rough interface, and part of them gave unsafe results for the grouting joints with rough interface and smooth interface. Finally, taking the interface structures into consideration, a calculation method for shear resistance capacity of precast concrete column joints was proposed.

**Key words:** precast concrete column; joint; interface structure; shear performance; calculation method

收稿日期: 2021-04-01

修改稿日期: 2021-04-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878478, 52130806)

第一作者: 刘博研(1995—), 男, 硕士生, 从事预制混凝土结构研究。E-mail: 1732525@tongji.edu.cn

通信作者: 薛伟辰(1970—), 男, 教授, 博士, “长江学者”特聘教授, 从事现代预应力结构、预制混凝土结构研究。E-mail: xuewc@tongji.edu.cn

预制混凝土结构中,接缝的抗剪性能对结构的整体性和抗震性能有重要影响<sup>[1]</sup>。预制混凝土框架结构中,预制柱接缝应具有可靠的抗剪性能<sup>[2]</sup>,根据界面构造不同,预制柱接缝可分为注浆接缝和叠合接缝<sup>[3]</sup>。注浆接缝指预制柱对位拼装时,构件间留有一定空隙,支模后在空隙中注浆而形成

的接缝,如图1(a)、(b)所示。注浆接缝其界面处理方式包括凿毛、设置齿槽等。叠合接缝指在已有的混凝土表面上直接浇筑新混凝土而形成的接缝,如图1(c)所示。叠合接缝的旧混凝土表面也应进行凿毛等处理。凿毛注浆、齿槽注浆和凿毛叠合是预制混凝土柱接缝的常见界面构造<sup>[4]</sup>。

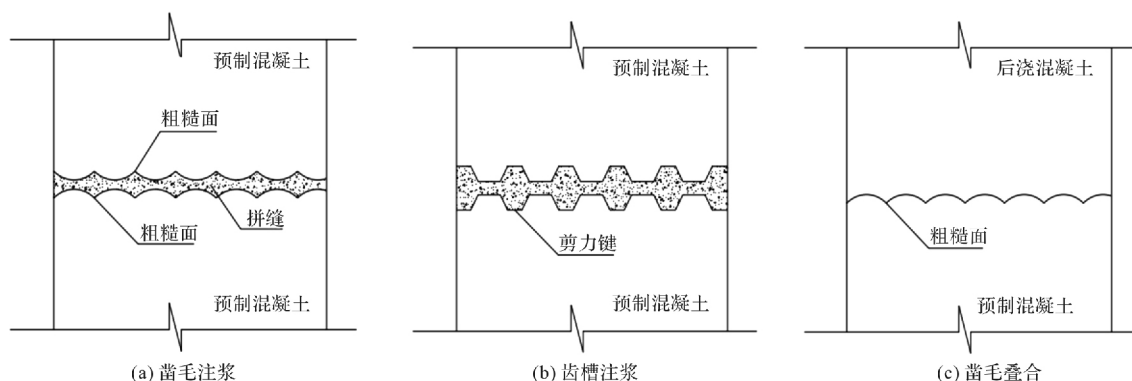


图1 预制混凝土柱接缝的界面构造<sup>[4]</sup>

Fig. 1 Interface structures of precast concrete column joints

国内外学者已针对不同界面构造的预制混凝土构件接缝的抗剪性能开展试验研究。加拿大曼尼托巴大学 Rizkalla 教授<sup>[5]</sup>开展了凿毛注浆和齿槽注浆接缝的抗剪试验,结果表明:齿槽注浆接缝的抗剪性能优于凿毛注浆接缝。美国德克萨斯大学奥斯汀分校 Carrasquillo 教授<sup>[6]</sup>开展了 33 个界面粗糙度不同的叠合接缝在反复荷载下的抗剪试验,试验未考虑轴向力的影响,结果表明:接缝抗剪承载力随界面粗糙度的增大而增大,加拿大女王大学 Soudki 教授<sup>[7]</sup>开展试验研究,考察了光面注浆、凿毛注浆、齿槽注浆接缝的抗剪性能,试验中未施加轴压力,结果表明:各接缝均发生剪切破坏,凿毛处理或设置齿槽可显著提升接缝的抗剪承载力。中国建筑科学研究院万墨林教授<sup>[8]</sup>开展了装配式大板接缝的抗剪试验,结果表明:在接缝界面设置齿槽可大幅提升接缝的抗剪承载力。合肥工业大学柳炳康教授<sup>[9]</sup>开展了 18 个齿槽注浆构造的装配式大板接缝在抗剪试验,结果表明:齿槽注浆接缝其抗剪承载力随连接钢筋配筋率和注浆层厚度的增加而增加。同济大学王伟教授<sup>[10]</sup>开展了 12 个预制混凝土接缝试件的抗剪试验,结果表明:接缝抗剪承载力的影响因素按影响大小排序依次为界面构造、连接钢筋配筋率和加载方式。

在预制混凝土构件接缝的计算理论方面,各国学者提出了多种接缝抗剪机理和抗剪承载力计算方法,美国华盛顿大学 Mattock 教授<sup>[11]</sup>研究了

接缝的界面摩擦机理,研究表明界面摩擦力与构件轴压力为线性关系。美国科罗拉多大学 Birkenland 教授<sup>[12]</sup>提出了剪切摩擦机理,给出了叠合界面剪切摩擦抗剪承载力的计算方法。Forester<sup>[5]</sup>、柳炳康等<sup>[9]</sup>,基于剪力键抗剪机理提出了齿槽注浆接缝抗剪承载力的计算方法。美国 ACI318<sup>[13]</sup>、PCI 设计手册<sup>[14]</sup>、欧洲 Eurocode 2<sup>[15]</sup>、新西兰 NZS3101<sup>[16]</sup>、新加坡设计手册<sup>[17]</sup>、日本装配式规范<sup>[18]</sup>中给出的接缝抗剪承载力的计算方法,适用于光面、凿毛和齿槽叠合构造,我国《装配式混凝土结构技术规程》(JGJ1-2014)<sup>[19]</sup>中给出了预制混凝土柱接缝抗剪承载力的计算方法,适用于注浆接缝,但未针对凿毛、齿槽等界面处理方式进一步划分。

综上,目前预制混凝土接缝抗剪性能研究中仍存在以下问题:

(1)针对预制混凝土剪力墙和装配式大板接缝的试验较多,针对预制混凝土柱接缝的试验较少;且大多未考虑轴向力;

(2)目前已提出界面摩擦机理、剪切摩擦机理、剪力键机理等抗剪机理,但主要针对叠合接缝,针对注浆接缝的抗剪机理仍有待研究;

(3)国外规范的预制混凝土接缝抗剪承载力计算方法主要针对叠合构造接缝,我国装配式规范中的计算方法适用于注浆接缝,但未对界面构造进一步区分;

为研究界面构造对预制混凝土柱接缝抗剪性能的影响,本文拟开展 4 个 0.4 轴压比下采用不同

界面构造(凿毛注浆、齿槽注浆、光面注浆、凿毛叠合)的预制混凝土柱接缝的抗剪试验。根据试验结果,分析不同界面构造接缝的荷载-滑移曲线、抗剪刚度、抗剪承载力等性能指标。基于试验结果和以往文献中试验数据,分析现有接缝抗剪承载力计算方法的适用性,拟提出考虑界面构造影响的预制混凝土柱接缝抗剪承载力计算方法。

## 1 试验设计

### 1.1 试件设计

设计了4个预制混凝土柱接缝足尺试件(JT-1~JT-4),其接缝界面分别采用光面注浆、凿毛注浆、齿槽注浆、凿毛叠合构造。所有试件均由上部构件和下部构件两部分组成,轴压比为0.4,接缝面尺寸为 $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ ,注浆层厚度为20 mm,试件的尺寸及配筋见图2。

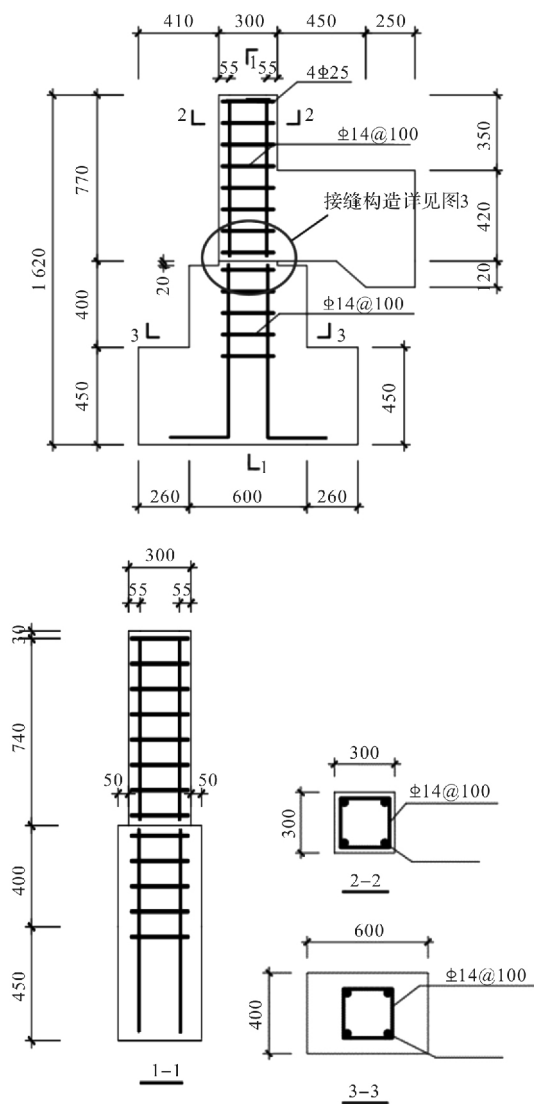


图2 试件尺寸及配筋

Fig. 2 Specimen geometry and reinforcement details

其中,试件JT-1采用光面注浆构造,为对比试件;接缝界面未经粗糙化处理,对位拼接后直接在接缝中注浆,界面的凹凸深度约2 mm。试件JT-2采用凿毛注浆构造,接缝界面经凿毛处理后对位拼接,在接缝中灌浆,界面的凹凸深度约6 mm。试件JT-3采用齿槽注浆构造,接缝界面设梯形齿槽,上底长30 mm,下底长50 mm,槽深20 mm。试件JT-4采用凿毛叠合构造,即已有的混凝土表面经凿毛处理后直接在其上浇筑新混凝土,形成叠合界面;界面的凹凸深度约6 mm。各试件接缝的界面构造见图3。试件JT-1~JT-3的注浆构造接缝可模拟预制柱底部接缝,试件JT-4的叠合构造接缝可模拟预制柱顶与现浇节点核心区的接缝。各试件均未配置连接钢筋,混凝土强度等级为C40级,上下构件的受力钢筋为HRB335级。

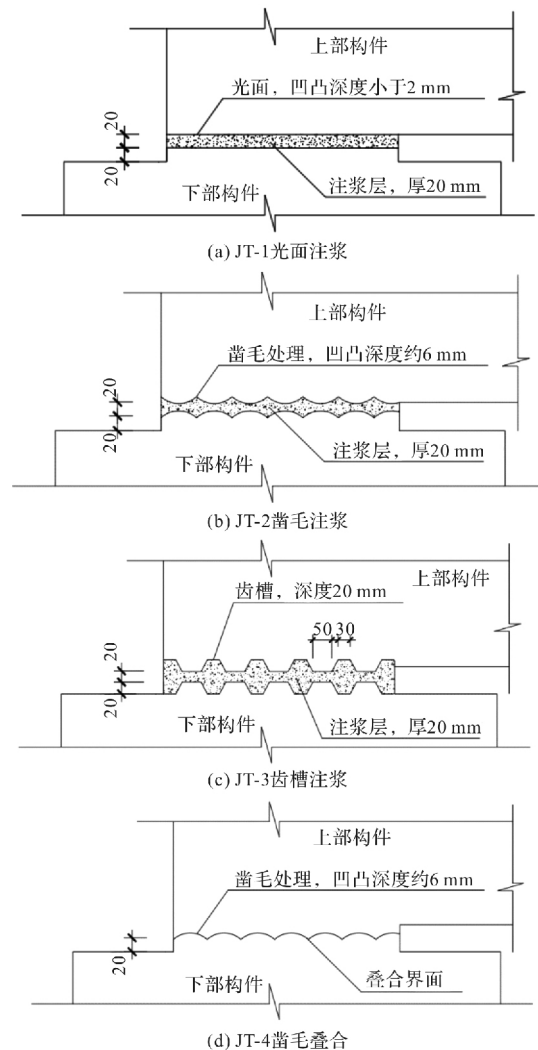


图3 试件接缝的界面构造

Fig. 3 Interface structures of specimens

### 1.2 加载方案

试验在同济大学建筑结构试验室的静力台座

上进行,采用两个固定于台座上的2 000 kN液压千斤顶分别施加竖向和水平荷载,加载装置如图4所示。

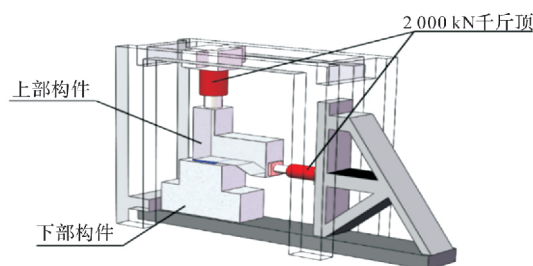


图4 试件加载装置

Fig. 4 Test setup

试件通过穿过下部构件的4根M80锚杆固定于刚性地面上,竖向千斤顶可随上部构件实现无阻尼水平跟动,保证所施加的力始终竖直向下。根据我国《混凝土结构试验方法标准》(GB/T50152-2012)<sup>[20]</sup>的规定,试验采用力控制加载方案:首先将竖向荷载加至预设轴压比对应的荷载值,并保持不变;随后采用力控制方案逐级施加单向的水平荷载,每级增量为50 kN,直至试件破坏。

### 1.3 量测内容

试验过程中量测的主要内容如下:

- (1)试件接缝所受的剪切荷载和相应的滑移值;
- (2)试件接缝的法向相对位移;
- (3)试件注浆层及附近混凝土的损伤情况;
- (4)试件上下构件的裂缝发展情况。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 受力过程和破坏形态

所有接缝试件均发生剪切破坏。试件的受力过程可分为弹性阶段、滑移阶段、极限阶段和破坏阶段,分别描述如下:

(1)弹性阶段:加载初期,接缝处于弹性阶段。接缝界面的滑移值很小,注浆层混凝土无明显损伤;

(2)滑移阶段:加载至极限荷载的20%~50%时,试件JT-1~JT-3的接缝出现较明显的滑移,注浆层混凝土开裂。试件JT-1仅注浆层出现斜裂缝;试件JT-2的注浆层和上、下构件靠近接缝处出现少许斜裂缝;试件JT-3的注浆层和齿槽出现斜裂缝。试件JT-4在加载至极限荷载的90%前几乎无滑移,接缝处开裂形成通缝后,才出现较明显的滑移;

(3)极限阶段:接缝界面的滑移值持续增大,

水平荷载逐渐达到峰值。试件JT-1~JT-3的注浆层混凝土破碎,小块剥落;试件JT-3齿槽侧面的斜裂缝宽度增加,齿槽混凝土破碎,小块剥落;试件JT-4的接缝界面出现明显滑移并逐渐增大,接缝两侧出现少许剪切斜裂缝。此时可测得各试件的接缝界面均发生不同程度的法向分离,以JT-3和JT-4最为明显;

(4)破坏阶段:水平荷载逐渐下降,接缝界面的滑移值迅速增大,进而失去抗剪承载力。试件JT-1~JT-3的注浆层混凝土碎裂、剥落。其中,试件JT-1接缝的破坏突然而迅速,滑移值与其他试件相比最小;试件JT-2的接缝破坏时滑移值较大,延性较好;试件JT-3的齿槽混凝土剪碎、剥落,上下构件靠近接缝处出现斜裂缝。试件JT-4接缝两侧混凝土破碎、小块剥落,上下构件靠近接缝处亦出现少量斜裂缝。

综上可知,各试件破坏时呈现剪切破坏形态,如图5所示。试件JT-1~JT-3的接缝破坏时,注浆层及附近混凝土破碎、剥落,接缝出现明显滑移,进而失去抗剪承载力。试件JT-4的接缝无注浆层,接缝发生通裂后两侧混凝土破碎剥落,滑移值逐渐增大直至破坏。在加载中,各试件的接缝界面均出现不同程度的法向分离。试件JT-3、JT-4接缝的法向相对位移较大,JT-2其次,JT-1最小。推测接缝法向相对位移的大小与界面粗糙度有关。



图5 试件破坏形态

Fig. 5 Failure modes of specimens

### 2.2 荷载-滑移曲线

根据位移计数据,可得到4个试件在加载过程中的荷载-滑移曲线,如图6。根据曲线上的特征

点可得到接缝试件在加载过程中荷载和位移的特征值,见表1。取曲线初始直线段的斜率作为接缝的弹性抗剪刚度;取接缝出现滑移(超过0.5 mm)时的荷载作为滑移时的荷载;取曲线的峰值荷载作为接缝的极限抗剪承载力。

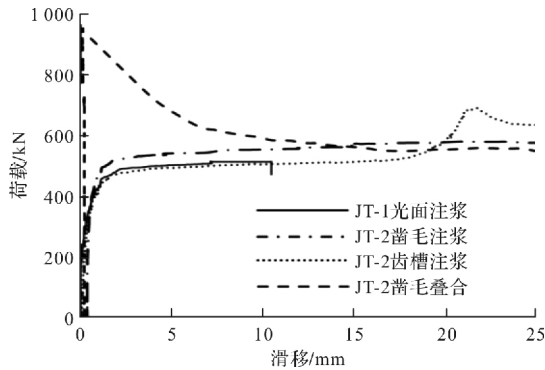


图6 接缝试件的荷载-滑移曲线

Fig. 6 Load-slip curves of specimens

表1 接缝试件的荷载和滑移特征值

Tab. 1 Characteristic values of specimens

试件	弹性抗 剪刚度 $K$ $/(kN \cdot mm^{-1})$	滑移 荷载 $P_s/kN$	峰值 荷载 $P_{max}/kN$	破坏 荷载 $P_u/kN$	破坏时 滑移 $\Delta_u/mm$
JT-1	703	430	517	473	10.5
JT-2	789	450	594	482	90.4
JT-3	735	500	690	571	61.7
JT-4	4 750	950	954	439	89.9

对比各试件的荷载-滑移曲线和特征值可得到以下结论:

(1)试件 JT-1、JT-2 的荷载-滑移曲线形状相似。加载初期二者的曲线接近直线,且基本重合;荷载达到约 450 kN 时接缝界面出现较明显滑移,曲线斜率减小,荷载增加变缓;当滑移达到 1~2 mm 时,荷载值基本保持稳定,滑移持续增加,曲线接近水平。光面注浆试件 JT-1 在滑移值达到 10.5 mm 时突然破坏,失去抗剪承载力;凿毛注浆试件 JT-2 在滑移值达 88.3 mm 时破坏,延性较好;

(2)试件 JT-3 的荷载-滑移曲线在加载初期与 JT-1、JT-2 的曲线接近,但加载至滑移值约 17 mm 时,荷载值再次上升,达到峰值后下降。这是因为接缝发生一定滑移后,作为剪力键的齿槽与注浆层混凝土压实,通过混凝土斜压杆机理充分发挥抗剪作用,使得荷载再次上升;

(3)试件 JT-4 的荷载-滑移曲线与其他试件有较大差异。接缝在加载初期几乎无滑移,出现滑移时即达到峰值荷载,随后荷载快速下降至一相

对稳定的水平,曲线在快速下降后保持水平。这是因为 JT-4 接缝为叠合界面,界面开裂前,接缝抗剪承载力由新旧混凝土间的粘结力和骨料咬合作用提供;开裂后粘结力失效,荷载快速下降,抗剪承载力主要由界面摩擦力提供。旧混凝土表面进行了凿毛处理,与凿毛注浆接缝的粗糙度相近,因此在加载后期试件 JT-4 的曲线与凿毛注浆试件 JT-2 的曲线接近;

(4)四种界面构造的接缝中,凿毛叠合接缝的弹性抗剪刚度最大,为其他试件的 6.02~6.76 倍。凿毛注浆、齿槽注浆和光面注浆接缝的弹性抗剪刚度接近,凿毛注浆接缝略高,其次为齿槽注浆接缝,光面注浆接缝略低,三者相差不超过 10.9%;

(5)四种界面构造的接缝中,凿毛叠合接缝的抗剪承载力最大,为光面注浆接缝的 1.85 倍。其次是齿槽注浆接缝,为光面注浆接缝的 1.33 倍;再次为凿毛注浆接缝,为光面注浆接缝的 1.15 倍。可见,叠合接缝的抗剪承载力高于注浆接缝;提高界面的粗糙程度有助于提高接缝的抗剪承载力;

(6)四种界面构造的接缝中,凿毛叠合和凿毛注浆接缝发生剪切破坏时的滑移值最大,分别为 89.9 mm 和 90.4 mm;其次为齿槽注浆接缝,为 61.7 mm;光面注浆接缝破坏时的滑移值最小,仅 10.5 mm,延性较差。可见,提高界面粗糙度可提升接缝的变形能力。

### 3 预制混凝土柱接缝抗剪承载力计算

#### 3.1 预制混凝土构件接缝的抗剪机理

预制混凝土构件接缝的抗剪机理主要包括界面摩擦机理、剪切摩擦机理、钢筋销栓抗剪机理和剪力键机理等,分别简述如下:

##### (1)界面摩擦机理

界面摩擦机理指接缝受剪时界面的法向压力在界面上产生的摩擦力抵抗剪力的作用。界面摩擦力与界面的粗糙度和法向压力有关。Mattock<sup>[11]</sup>和万墨林<sup>[8]</sup>的研究表明,界面摩擦力与界面压力在一定范围内呈线性关系;

##### (2)剪切摩擦机理

剪切摩擦机理由 Birkeland<sup>[12]</sup>提出。在剪力作用下,接缝界面同时发生滑移和分离,穿过接缝的钢筋受拉变形,在混凝土中产生压应力,进而在接缝界面处产生抵抗剪力的切向的摩擦力,即剪切摩擦机理,如图 7(a)所示。影响剪切摩擦抗剪承载力的主要因素有界面构造、连接钢筋的类

型和配筋率、混凝土种类与强度等<sup>[12]</sup>;

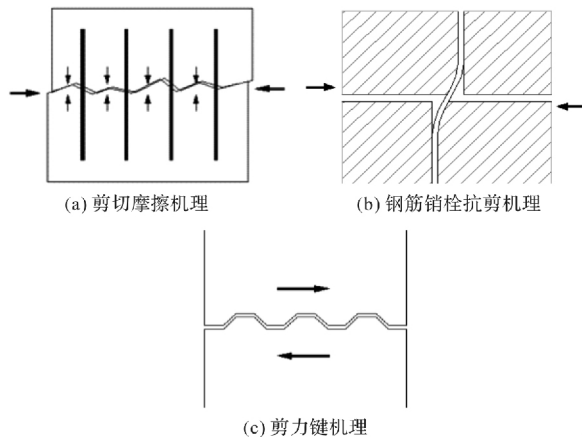


图7 预制混凝土构件接缝的抗剪机理<sup>[4]</sup>

Fig. 7 Shear-resistance mechanism of precast concrete joints

### (3) 钢筋销栓抗剪机理

钢筋销栓抗剪机理指穿过接缝的钢筋在接缝受剪滑移时发生弯曲,并直接抵抗剪力的作用,类似于插销,如图7(b)所示.单根钢筋的销栓抗剪承载力随钢筋直径的增大而增大,随钢筋中拉力的增加而减小<sup>[21]</sup>;

### (4) 剪力键机理

剪力键机理指接缝界面上相互嵌合的凹凸形状的齿槽(即剪力键)抵抗剪力的作用,如图7(c)所示.剪力键的抗剪承载力由凸出部分的承压强度和剪切强度的较小值确定,与齿槽的形状、尺寸和混凝土强度有关.

奥地利因斯布鲁克大学 Randel 博士<sup>[22]</sup>的研究表明:不同种类的抗剪机理在接缝受剪时并非同时发挥作用.当剪力较小时,接缝几乎无滑移,界面摩擦机理起主要作用;随剪力增大,接缝产生滑移,界面摩擦机理、剪切摩擦机理或钢筋销栓抗剪机理起主要作用.当钢筋直径和配筋率较小时,钢筋主要发生受拉变形,剪切摩擦机理起主要作用;当钢筋直径较大且配筋率较高时,钢筋本身的抗弯能力和抗剪能力强,钢筋销栓抗剪机理起主要作用.此外,若接缝界面设有剪力键,在剪力键充分接触、压实前界面摩擦机理起主要的抗剪作用;剪力键充分压实后,剪力则部分由剪力键承担;当剪力键受剪破坏后,接缝继续发生滑移,界面摩擦机理、剪切摩擦机理或钢筋销栓抗剪机理发挥抗剪作用.

对本文试验中的预制混凝土柱接缝,凿毛注浆接缝、光面注浆接缝的抗剪机理为界面摩擦机理;齿槽注浆接缝的抗剪机理为界面摩擦机理和剪力键机理;凿毛叠合接缝的抗剪机理为界面摩

擦机理和新旧混凝土间的胶结力及骨料咬合作用.

## 3.2 国内外规范中接缝抗剪承载力的计算方法

国内外规范中预制混凝土构件接缝抗剪承载力的计算方法所考虑的抗剪机理不尽相同,各机理的组合方式也有区别.为分析各国规范中计算方法的差异,评价其对预制混凝土柱接缝的适用性,现将各国规范中的计算方法介绍如下:

### (1) 美国 ACI 318-19

美国 ACI 318-19<sup>[13]</sup>中混凝土接缝抗剪承载力的计算方法采用了 Birkeland<sup>[12]</sup>提出的剪切摩擦抗剪承载力的计算公式,仅考虑了剪切摩擦机理,如式(1)所示,计算结果偏于保守<sup>[4]</sup>.

$$V_u \leq \phi V_n \leq \phi A_s f_y (\mu \sin \alpha + \cos \alpha) \quad (1)$$

式中:  $V_u$  为接缝抗剪承载力,折减系数  $\phi$  取 0.75;  $V_n$  为名义抗剪承载力,要求不超过  $0.2f'_c A_c$  和  $0.5A_c$ ;  $A_c$  为剪切面面积,  $f'_c$  为混凝土圆柱体抗压强度;  $A_s$  为穿过接缝的钢筋截面面积;  $f_y$  为钢筋屈服强度;  $\alpha$  为钢筋与接缝界面的夹角.摩擦系数  $\mu$  的取值如表2所示;

表2 ACI 318-19<sup>[13]</sup>中界面摩擦系数  $\mu$  的取值

Tab. 2 Coefficients of friction  $\mu$  in ACI 318-19

界面类型	$\mu$
整浇混凝土	$1.4\lambda$
新旧混凝土,表面经粗糙化处理	$1.0\lambda$
新旧混凝土,表面未经粗糙化处理	$0.6\lambda$
带栓钉的钢-混凝土组合界面	$0.7\lambda$

注:  $\lambda$  为轻骨料混凝土影响系数,对普通混凝土取 1.0,对砂轻型混凝土取 0.85,对全轻型混凝土取 0.75.

### (2) 美国 PCI 设计手册第8版(2021)

美国 PCI 设计手册第8版<sup>[14]</sup>中的计算方法考虑了剪切摩擦机理,在 ACI 318-19<sup>[13]</sup>中计算方法的基础上引入了有效摩擦抗剪系数( $\mu_e$ )的概念,并提高了抗剪承载力的上限值.接缝抗剪承载力计算公式如式(2),所考虑的界面构造及其摩擦系数的取值与 ACI318-19<sup>[13]</sup>一致,见表2;

$$\begin{cases} V_u = \phi A_s f_y \mu_e \\ \mu_e = \frac{6.9\lambda A_s \mu}{V_u} \end{cases} \quad (2)$$

### (3) 欧洲 Eurocode 2(2014)

欧洲规范 Eurocode 2<sup>[15]</sup>的计算方法考虑了界面摩擦机理和剪切摩擦机理,并考虑了混凝土开裂后抗剪承载力的折减.该计算方法考虑了混凝土强度的贡献,在界面构造方面考虑了齿槽构造,并给出了相应的摩擦系数  $\mu$ .接缝抗剪承载力的计算公式如式(3),摩擦系数的取值见表3.



$$V_u \leq c f_t A_c + \mu N + A_s f_y (\mu \sin \alpha + \cos \alpha) \leq 0.5 v f_c A_c \quad (3)$$

式中:  $f_t$  为混凝土抗拉强度;  $c$ 、 $\mu$  为反映界面粗糙程度的系数;  $N$  为构件轴向力, 当  $N$  为正时, 不超过  $0.6 f'_c A_c$ ;  $v$  为混凝土开裂后抗剪承载力的折减系数;

表3 Eurocode 2<sup>[15]</sup> 中界面摩擦系数  $c$  和  $\mu$  的取值

Tab. 3 Coefficients of friction  $c$  and  $\mu$  in Eurocode 2

界面类型	$c$	$\mu$
钢、塑料、模具与混凝土	0.25	0.5
新旧混凝土, 表面未处理	0.35	0.6
新旧混凝土, 表面经粗糙化处理	0.45	0.7
新旧混凝土, 设置键槽	0.50	0.9

注: 表中粗糙处理界面要求至少有 3 mm 的粗糙深度和 40 mm 的宽度。

#### (4) 新西兰 NZS 3101-2006

新西兰规范 NZS 3101-2006<sup>[16]</sup> 中的计算方法考虑了界面摩擦机理和剪切摩擦机理, 如式(4)。该计算方法所考虑的界面构造及相应摩擦系数  $\mu$  的取值与 ACI 318-19<sup>[13]</sup> 一致。当构件轴向力较大时该计算方法偏不安全<sup>[4]</sup>;

$$V_u = A_s f_y (\mu \sin \alpha + \cos \alpha) + \mu N \quad (4)$$

#### (5) 新加坡设计手册(2001)

新加坡设计手册(2001)<sup>[17]</sup> 的计算方法考虑了界面摩擦机理和剪切摩擦机理, 形式与 NZS3101-2006<sup>[16]</sup> 类似, 如式(5)。该方法的摩擦系数  $\mu$  取值较高, 见表4;

$$V_u = \mu (0.87 A_s f_y + N) \quad (5)$$

表4 新加坡设计手册(2001)<sup>[17]</sup> 中界面摩擦系数  $\mu$  取值

Tab. 4 Coefficients of friction  $\mu$  in the Singapore Code

界面类型	$\mu$
整浇混凝土	1.7
新旧混凝土, 表面经粗糙化处理	1.4
新旧混凝土, 表面未经粗糙化处理	0.7

#### (6) 日本 JSCE 设计指针(2007)

日本 JSCE 设计指针<sup>[18]</sup> 中考虑了界面摩擦机理、钢筋销栓抗剪机理和剪力键机理, 由于三者不能同时发挥作用, 取三者中较大值作为接缝抗剪承载力, 如式(6)~(10)。剪力键抗剪承载力取剪力键承压强度和剪切强度中较小值, 可与现浇混凝土提供的抗剪承载力叠加。

$$V_u = \max(V_c, V_{sk} + V_{ss}, V_{do}) \quad (6)$$

$$V_c = \mu N \quad (7)$$

$$V_{sk} = \min(0.5 \sqrt{f_{cp}} A_a, 1.0 f_{cp} A_b) \quad (8)$$

$$V_{ss} = 0.5 \sqrt{f_{cs}} A_{ss} \quad (9)$$

$$V_{do} = 1.65 n_d A_s \sqrt{f_{cs} f_y} \quad (10)$$

式中:  $V_{do}$  为钢筋销栓抗剪承载力,  $n_d$  为销栓钢筋数量;  $f_{cs}$  为现浇混凝土强度,  $f_{cp}$  为预制混凝土强度;  $A_a$ 、 $A_b$  为剪力键的剪切面积和承压面积,  $A_{ss}$  为现浇混凝土剪切面积。该计算方法所考虑的界面构造和相应的摩擦系数的取值与 ACI318-19<sup>[13]</sup> 一致, 见表2;

(7) 我国《装配式混凝土结构技术规程》(JGJ1-2014)

我国 JGJ1-2014<sup>[19]</sup> 中给出了预制混凝土柱底水平缝抗剪承载力的计算方法, 如式(11)。该方法考虑了界面摩擦机理和钢筋销栓抗剪机理, 区分了预制柱受拉和受压两种情况, 适用于凿毛注浆或齿槽注浆接缝, 但摩擦系数统一取 0.8, 较为笼统。钢筋销栓抗剪承载力的计算表达式沿用了日本 JSCE 设计指针<sup>[18]</sup> 的形式。当轴压力较大时该公式的计算结果偏不安全<sup>[4]</sup>。

$$V_u = \begin{cases} 0.8N + 1.65A_s \sqrt{f_{cs} f_y} & (\text{预制柱受压}) \\ 1.65A_s \sqrt{f_{cs} f_y \left(1 - \left(\frac{N}{A_s f_y}\right)^2\right)} & (\text{预制柱受拉}) \end{cases} \quad (11)$$

### 3.3 接缝抗剪承载力的规范计算值与试验值对比

为评价各国规范中混凝土接缝抗剪承载力的计算方法对不同界面构造的预制混凝土接缝的适用性, 基于第二章中试验结果, 以及文献[5, 9-10, 23-24]中有关注浆接缝和叠合接缝抗剪试验的数据, 将采用各国规范计算方法求得的接缝抗剪承载力计算值与试验值进行对比, 结果列于表5、表6中。表中:  $V_{Exp}$  为试件接缝抗剪承载力的试验值,  $V_{ACI}$ 、 $V_{PCI}$ 、 $V_{EN}$ 、 $V_{NZS}$ 、 $V_{SGP}$ 、 $V_{JP}$ 、 $V_{JGJ}$ 、 $V_{JY}$  分别为根据 ACI 318-19<sup>[13]</sup>、PCI 设计手册(2021)<sup>[14]</sup>、Eurocode 2(2014)<sup>[15]</sup>、NZS 3101-2016<sup>[16]</sup>、新加坡设计手册(2001)<sup>[17]</sup>、日本 JSCE 设计指针(2007)<sup>[18]</sup>、我国 JGJ1-2014<sup>[19]</sup> 中的计算方法和本文建议计算方法求得的抗剪承载力计算值(本文建议方法的详细内容将在后文中说明)。文献中的试验数据共 40 组, 包含 7 组光面注浆接缝, 25 组齿槽注浆接缝, 8 组凿毛叠合接缝, 加载方式包括单向和循环反复两种。凿毛注浆接缝由于收集到的试验数据较少未计入。需要指出, 由于 ACI318-19<sup>[13]</sup>、PCI 设计手册(2021)<sup>[14]</sup> 中的计算方法仅考虑了剪切摩擦机理, 因此对于未配置连接钢筋的接缝试件的计算结果为 0。

由表5、表6中数据对比可知, ACI 318-19<sup>[13]</sup> 的接缝抗剪承载力计算方法未考虑构件轴向力的

作用, 计算结果过于保守, 无连接钢筋时计算结果为 0. PCI 设计手册(2021)<sup>[14]</sup>的计算结果对于光面注浆、齿槽注浆、凿毛叠合界面偏于不安全. Eurocode 2(2014)<sup>[15]</sup>的计算结果对于光面注浆接缝偏于不安全, 对叠合接缝较保守. NZS 3101-2016<sup>[16]</sup>的计算方法对光面注浆接缝的试验数据吻合较好, 对其他构造的接缝较保守. 新加坡设计

手册(2001)<sup>[17]</sup>的计算结果与试验值较接近, 仅个别试件偏于不安全. 日本 JSCE 设计指针(2007)<sup>[18]</sup>的计算结果过于离散. 我国 JGJ1-2014<sup>[19]</sup>的计算结果与本文试验结果吻合良好, 但对于部分文献中的试验数据过于保守, 与文献中的试验大部分未施加构件轴向力有关.

表 5 本文试件的接缝抗剪承载力试验值与规范计算值及建议方法计算值的对比

Tab. 5 Comparison of the test results in this study with the calculated results from the codes and suggested method

试件	$V_{Exp}/\text{kN}$	计算值/试验值							
		$\frac{V_{ACI}}{V_{Exp}}$	$\frac{V_{PCI}}{V_{Exp}}$	$\frac{V_{EN}}{V_{Exp}}$	$\frac{V_{NZS}}{V_{Exp}}$	$\frac{V_{SGP}}{V_{Exp}}$	$\frac{V_{JP}}{V_{Exp}}$	$\frac{V_{JGJ}}{V_{Exp}}$	$\frac{V_{JY}}{V_{Exp}}$
JT-1	517	0	0	0.80	0.91	1.00	0.82	1.01	0.88
JT-2	594	0	0	0.70	0.80	0.87	1.19	0.88	0.88
JT-3	690	0	0	0.59	0.68	0.75	2.11	0.76	0.89
JT-4	954	0	0	0.49	0.71	1.08	1.00	0.55	0.90
平均值	0	0	0.65	0.78	0.93	1.28	0.80	0.89	

表 6 文献[5, 9, 10, 23, 24]中接缝抗剪承载力试验值与规范计算值及建议方法计算值的对比

Tab. 6 Comparison of the test results in existing studies with the calculated results from the codes and suggested method

界面构造	试件组数	计算值/试验值															
		$\frac{V_{ACI}}{V_{Exp}}$		$\frac{V_{PCI}}{V_{Exp}}$		$\frac{V_{EN}}{V_{Exp}}$		$\frac{V_{NZS}}{V_{Exp}}$		$\frac{V_{SGP}}{V_{Exp}}$		$\frac{V_{JP}}{V_{Exp}}$		$\frac{V_{JGJ}}{V_{Exp}}$		$\frac{V_{JY}}{V_{Exp}}$	
		平均	变异	平均	变异	平均	变异	平均	变异	平均	变异	平均	变异	平均	变异	平均	变异
		值	系数	值	系数	值	系数	值	系数	值	系数	值	系数	值	系数	值	系数
齿槽注浆 <sup>[5,9,23]</sup>	25	0.45	0.17	1.42	0.10	1.34	0.14	0.65	0.22	0.83	0.28	0.51	0.38	0.40	0.42	0.44	0.54
凿毛叠合 <sup>[10,24]</sup>	8	0.51	0.22	1.13	0.23	0.80	0.20	0.68	0.22	0.83	0.22	0.25	0.24	0.25	0.24	0.25	0.24
光面注浆 <sup>[5,23]</sup>	7	0.80	0.34	1.13	0.34	1.31	0.45	0.97	0.56	1.06	0.52	0.72	0.43	1.03	0.43	0.96	0.46

综上可知, 国外规范中接缝抗剪承载力的计算方法多适用于叠合构造的接缝, 对于注浆接缝的计算结果与试验值吻合较差, 适用性不强, 而对于凿毛叠合接缝的计算值也大多偏于保守. 我国 JGJ1-2014<sup>[19]</sup>的计算结果与本文试验的数据吻合较好, 但未对凿毛注浆、齿槽注浆、凿毛叠合等特定的界面构造进行区分, 适用性有待提高. 因此, 有必要对现有计算方法进行修正和完善.

3.4 预制混凝土柱接缝抗剪承载力拟计算方法

根据试验结果, 提出了考虑界面构造影响的预制混凝土柱接缝抗剪承载力计算方法(以下简称建议方法), 如式(12), 该方法主要适用于预制柱柱底的水平缝和柱顶与现浇节点核心区的接缝. 建议方法采用我国规范 JGJ1-2014<sup>[19]</sup>中预制混凝土柱底水平缝抗剪承载力计算公式的基本形式, 并根据试验数据的拟合结果, 给出了几种常见界面构造的摩擦系数的建议取值, 如表 7 所示.

$$V_u = \mu N + 1.65A_s \sqrt{f_c f_y} \quad (12)$$

表 7 本文建议的接缝界面摩擦系数  $\mu$  的取值

Tab. 7 Suggested values for friction coefficient  $\mu$  of interfaces

界面构造	$\mu$
光面注浆	0.7 $\lambda$
凿毛注浆	0.8 $\lambda$
齿槽注浆	1.0 $\lambda$
凿毛叠合	1.4 $\lambda$

注: ① $\lambda$  为轻骨料混凝土影响系数, 对普通混凝土取 1.0, 对砂轻混凝土取 0.85, 对全轻混凝土取 0.75; ②凿毛注浆和凿毛叠合界面的凹凸深度不小于 6 mm, 齿槽界面的齿槽深度不小于 20 mm.

基于本文试验数据, 采用建议方法求得的接缝抗剪承载力计算值与试验值的对比见表 5. 可见, 建议方法的计算值与试验值接近, 且稳定性较好. 基于现有文献中的试验数据, 采用建议方法求得的计算值与试验值的对比见表 6. 可见, 建议方法对光面注浆的计算结果与试验值较为接近, 对齿槽注浆、凿毛叠合等构造的计算结果偏于保守, 后续可进一步开展研究加以完善.



## 4 结论

本文开展了4个轴压比为0.4的预制混凝土柱接缝足尺试件的抗剪试验,研究了采用凿毛注浆、齿槽注浆、凿毛叠合等界面构造的接缝的抗剪性能,并与光面注浆接缝的抗剪性能进行对比.试验的主要结论如下:

(1)接缝试件均发生剪切破坏,其受力过程可分为弹性阶段、滑移阶段、极限阶段和破坏阶段.光面注浆接缝破坏时滑移值较小,破坏较突然;凿毛注浆接缝破坏时滑移值较大,注浆层混凝土破碎并小块剥落;齿槽注浆接缝破坏时齿槽和注浆层混凝土破碎剥落,上下构件靠近接缝处出现剪切斜裂缝;凿毛叠合接缝破坏时滑移值较大,接缝处混凝土破碎、小块剥落,接缝两侧出现少量剪切斜裂缝.各接缝界面破坏时均出现不同程度的法向分离;

(2)凿毛注浆与光面注浆接缝的荷载-滑移曲线形状接近,但凿毛注浆接缝破坏时滑移更大,延性更好.齿槽注浆接缝的曲线初期与凿毛注浆接缝接近,但由于齿槽抗剪作用,加载后期荷载继续升高至峰值,随后下降.凿毛叠合接缝的曲线在初期即达到峰值,接缝通裂后荷载下降至一稳定水平,直至破坏;

(3)四种界面构造的接缝中,凿毛叠合接缝的抗剪承载力最大,为光面注浆接缝的1.85倍;齿槽注浆接缝抗剪承载力为光面注浆接缝的1.33倍;凿毛注浆接缝为光面注浆接缝的1.15倍.提高界面的粗糙度有助于提高接缝的抗剪承载力.

(4)根据各国规范中接缝抗剪承载力的计算方法,求得本文和现有文献中试件的接缝抗剪承载力计算值,并与试验值对比.结果表明,国外规范中的几种计算方法主要适用于叠合接缝,注浆接缝的计算结果与试验值偏差较大,而叠合接缝的计算结果也多偏于保守.我国JGJ1-2014<sup>[19]</sup>的计算结果与试验值吻合较好,但未对界面构造进行区分;

(5)根据试验结果,基于我国规范JGJ1-2014<sup>[19]</sup>提出了考虑界面构造影响的预制混凝土柱接缝抗剪承载力的建议计算方法.建议方法的计算结果与试验结果相近,且稳定性较好.

## 参考文献 References

- [1] 孙哲,胡翔,薛伟辰. 预制混凝土柱接缝的施工要点与受剪承载力计算[J]. 建筑施工, 2015(5):564-567.
- [2] 李爱群,王维,贾洪,等. 预制钢筋混凝土剪力墙结构抗震性能研究进展(I):接缝性能研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2013(5):600-605.
- [3] 赵作周,周剑,侯建群,等. 装配式混凝土剪力墙结构水平缝抗剪机理及承载力计算方法综述[J]. 建筑结构, 2015, 45(12):40-47,39.
- [4] 薛伟辰,胡翔,孙哲. 预制混凝土框架构件接头受力性能与设计方法研究[R]. 上海:同济大学,2012.
- [5] FOERSTER H R, RIZKALLA S H, HEUVEL J S. Behavior and design of shear connection for load bearing wall panel[J]. PCI Journal, 1989,34(1):102-119.
- [6] Bass Robert A, Carrasquillo Ramon L, Jira James O. Shear transfer across new and existing concrete interfaces[J]. ACI Structural Journal, 1989, 86(4):383-393.
- [7] SOUDKI, K A, WEST J S, RIZKALLA S H., et al. Horizontal connections for precast concrete shear wall panels under cyclic shear loading[J]. PCI journal, 1996, 41(3), 64-80.
- [8] 万墨林,曾兵. 大板结构接缝的强度和刚度[J], 建筑结构学报,1986,7(4):54-69.
- [9] 柳炳康,宋国华. 装配式大板结构竖缝抗剪机理研究[J]. 郑州大学学报(工学版),2002,23(2):74-78.
- [10] LIU Bingkang, SONG Guohua. Study on shear-resistance mechanisms for vertical connections of precast reinforced concrete structures[J], Journal of Zhengzhou University(Engineering Science), 2002,23(2):74-78.
- [11] SUN Zhe, HU Xiang, XUE Weichen. Key construction points of precast concrete column joints and calculation of shear capacity[J]. Building Construction, 2015(5):564-567.
- [12] LI Aiqun, WANG Wei, JIA Hong, et al. Progress of Investigation on seismic behavior of precast RC shear wall structures (I): Joint Property Study[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013(5):600-605.
- [13] ZHAO Zuozhou, ZHOU Jian, HOU Jianqun, et al. Review of studies on shear resisting mechanisms and calculating formulas of shear resisting capacity of horizontal joints in fabricated reinforced concrete shear wall structures, Building Structure, 2015, 45(12):40-47,39.

- [10] 王伟,苏小卒,赵勇. 钢筋混凝土界面剪力传递性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(9):73-81.  
WANG Wei, SU Xiaozu, ZHAO Yong, Experimental study on shear transfer behavior along RC interface, Journal of Building Structures, 2013, 34(9):73-81.
- [11] MATTOCK A H, HAWKINS N M. Shear transfer in reinforced concrete-recent research [J]. PCI Journal 1972; 17(2): 55-75.
- [12] BIRKELAND P W, BIRKELAND H W. Connections in precast concrete construction [J]. In Journal Proceedings. 1966 , 63(3): 345-368.
- [13] ACI 318-19. Building code requirements for structural concrete[S]. Farmington Hills, MI : American Concrete Institute, 2019.
- [14] PCI design handbook (8th edition): precast and prestressed concrete[S]. L Chicago: IPrecast/Prestressed Concrete Institute (PCI), , 2021.
- [15] EN 1992-1-1-2004/A1:2014, Eurocode 2: Design of concrete structures-Part 1-1: General rules and rules for buildings[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2014.
- [16] Concrete Design Committee for the Standards Council (New Zealand). Concrete Structures Standard: Part 1-The Design of Concrete Structures NZS3101: 2006 [S]. Wellington: Standards New Zealand, 2006.
- [17] Building & Construction Authority (Singapore). Structural Precast Concrete Handbook[G]. Singapore: Construction Industry Development Board of Singapore, 2001.
- [18] JSCE Guidelines for Concrete No. 15. Standard specifications for concrete structures[S]. Tokyo: Japan Society of Civil Engineers, 2007.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 装配式混凝土结构技术规程:JGJ1-2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.  
MOHURD. Technical specification for precast concrete structures; JGJ1-2014[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构试验方法标准: GB/T50152-2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
MOHURD. Standard for test method of concrete structures; GB/T50152-2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [21] MILLARD S G, JOHNSON R P. Shear transfer across cracks in reinforced concrete due to aggregate interlock and to dowel action[J]. Magazine of concrete research, 1984, 36(126): 9-21.
- [22] RANDI N. Investigations on transfer of forces between old and new concrete at different joint roughness [D]. University of Innsbruck, Innsbruck, Austria, 1997.
- [23] RIZKALLA S H, SERRETTE R L, HEUVEL J S, et al. Multiple shear key connections for precast shear wall panels[J]. PCI Journal, 1989, 34(2):104-120.
- [24] 屈文俊, 毛雯婷, 郭志卓. 既有混凝土柱-现浇梁界面受剪性能研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(9):57-63.  
QU Wenjun, MAO Wenting, GUO Zhizhuo. Shear capacity of joints connecting post-cast concrete beams to existing structures[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(9):57-63.

(编辑 沈 波)