

## 新旧混凝土界面双面直剪性能尺寸效应试验研究

吴二军<sup>1,2</sup>, 刘谦<sup>1</sup>, 胡雨晴<sup>2</sup>

(1. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098;

2. 中国能源建设集团浙江省电力设计院有限公司, 浙江 杭州 310012)

**摘要:** 以界面处理方式、横向约束形式、混凝土强度、界面尺寸为变量, 开展了8组50个新旧混凝土界面试件双面直剪试验研究, 得到界面受剪破坏形态和抗剪强度-滑移曲线, 分析界面抗剪强度的尺寸效应规律, 拟合得到新旧混凝土双面直剪试件极限应力尺寸效应的换算系数, 建立受剪承载力计算表达式。结果表明: 在剪力作用方向上, 新旧混凝土界面受剪极限应力存在明显的随界面高度增加而降低的尺寸效应现象; 开裂应力、裂通应力以及滑移的尺寸效应不明显; 施加横向约束可提升界面裂通应力和极限应力; 施加预压应力可显著提升试件的裂通应力, 并有效限制试件的极限滑移。无横向约束条件下, 凿毛形式对极限应力影响显著, 相比整浇混凝土试件, 机械凿毛的同强度新旧混凝土双面直剪极限应力减少至整浇试件的0.22以下, 而人工凿毛试件的折减系数在0.34~0.37之间。有横向约束条件下, 同凿毛粗糙界面相比, 规则齿槽试件的开裂应力、裂通应力以及滑移表现优势突出; 约束下强度折减系数提高到无约束同等条件试件的2~2.5倍以上, 最大可达到整浇试件强度的0.97倍。新旧混凝土强度提高可增加试件裂通应力和极限应力, 但提升幅度有限。

**关键词:** 新旧混凝土界面; 受剪性能; 尺寸效应; 双面直剪

**中图分类号:** TU528.1

**文献标识码:** A

## Experimental Study on the Size Effect of New-Old Concrete Interface Under Double-Face Direct Shear

WU Erjun<sup>1</sup>, LIU Qian<sup>1</sup>, HU Yuqing<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Transportation, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. China Energy Engineering Group Zhejiang Electric Power Design Institute Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310012, China)

**Abstract:** Eight sets of 50 new-old concrete interface specimens were subjected to double-sided direct shear tests using the interface processing method, lateral constraint form, concrete strength, and interface size as variables. The shear failure mode and shear strength slip curve of the interface were obtained, and the size effect law of the interface shear strength was analyzed. The conversion coefficient of the ultimate stress size effect of the new-old concrete double-sided direct shear specimens was fitted, and an expression for calculating the shear bearing capacity was established. The results show that in the direction of shear force, there is a significant size effect phenomenon in which the shear ultimate stress at the interface between new and old concrete decreases with the increase of interface height. The size effect of cracking stress, crack through stresses, and slip is not significant. Applying lateral constraints can increase the interface crack through stress and ultimate stress. Applying preloading stress can significantly increase the crack-through stress of the specimen and effectively limit the ultimate slip of the specimen. Under the condition of no lateral constraint, the chiseling form has a significant impact on the ultimate stress. Compared with the whole poured concrete specimen, the mechanical chiseling of new-

收稿日期: 2023-12-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(519037311)

作者简介: 吴二军(1972-), 男, 河北顺平人, 博士, 副教授, 从事建筑平移加固及改造方面的研究。

old concrete with the same strength reduces the double-sided direct shear ultimate stress to below 0.22 of the whole poured specimens, while the reduction coefficient of the manual chiseling specimen is between 0.34 and 0.37. Under lateral constraint conditions, compared to the rough interface with chiseling, the regular tooth groove specimen has prominent advantages in cracking stress, crack through stress, and slip performance. The strength reduction coefficient under constraint can be increased to more than 2~2.5 times that of the unconstrained specimens under the same conditions, and the maximum strength can reach 0.97 times that of the cast-in-place specimens. The increase in the strength of new-old concrete can increase the crack through stress and ultimate stress of specimens, but the extent of improvement is limited.

**Key words:** new-old concrete interface; shear performance; size effect; double-sided direct shear

研究表明,混凝土强度存在显著的尺寸效应,表现为:尺寸越大,平均强度越小。工程设计中,特别是大尺度构件,所取材料力学性能参数如果不考虑尺寸效应,无疑将高估结构的承载能力,带来安全隐患。过去几十年中,尺寸效应机理及其定量评估得到国内外多位学者关注并开展了研究。Kani<sup>[1]</sup>对截面高度在150~1 220 mm之间的几何相似的无腹筋钢筋混凝土梁进行受剪试验,发现钢筋混凝土简支梁在梁高方向(剪力作用方向)尺寸效应显著,但强度变化与宽度无相关性。Chana<sup>[2]</sup>完成了36根截面高度在150~750 mm之间的钢筋混凝土简支梁受剪试验,得出相似结论。Shioya等<sup>[3]</sup>开展了最大截面有效高度为3 000 mm的无腹筋简支梁受剪试验,发现其受剪强度随截面高度的增加而明显减小。于磊等<sup>[4-5]</sup>对截面尺寸为600 mm×1 200 mm的无腹筋钢筋混凝土梁进行受剪试验,发现大尺寸无腹筋钢筋混凝土梁的受剪承载力存在明显的尺寸效应。Weibull<sup>[6]</sup>基于最弱链假定提出统计尺寸效应理论。Bazant<sup>[7]</sup>基于裂缝带模型提出了尺寸效应律公式。Carpinteri等<sup>[8]</sup>基于分形自相似的概念,提出了多重分形尺度律公式。Hu等<sup>[9]</sup>基于边界效应模型提出边界尺寸效应理论,认为不同尺寸裂缝会对断裂失效的混凝土试件名义强度造成影响。《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[10]</sup>也规定了一般板类受弯构件斜截面受剪承载力计算时,应考虑尺寸效应,并分别建议了形式基本相同的考虑截面高度的尺寸效应系数。

随着既有建筑物加固改造工程的日益增加和预制装配式建筑的兴起,新旧混凝土界面受力性能成为土木工程领域研究热点问题之一。由于界面影响因素众多,以及问题的复杂性,自20世纪60年代至今,众多学者进行了大量研究,但至今仍未成熟。研究内容涉及界面处理方式、界面粘结方式的参数

影响规律、界面粘结机理与界面受剪强度的计算公式等方面<sup>[11-17]</sup>,然而至今鲜见涉及新旧混凝土界面受剪性能尺寸效应的相关研究。毋庸置疑的是,实际工程中的新旧混凝土界面尺度通常远大于试件界面尺度,采用小尺度试件得到的界面强度用于大尺度试件的设计,显然增大了结构的失效概率。

## 1 试验方案

### 1.1 试件设计

本文选取了操作简单、最接近实际工程中界面工作状态的双面直剪试验开展研究,试件形状和尺寸如图1所示。共设计制作2组6个整浇试件和8组33种44个新旧混凝土双面直剪试件,变量除了界面尺度外,界面切凿方式、横向约束、混凝土强度也作为影响参量进行分析。所有试件以平均凹凸深度10 mm作为凿毛控制目标,试件的界面处理方式有机械凿毛、人工凿毛和规则齿槽三种,界面处理效果如图2所示。试件编号和参数参见表1。

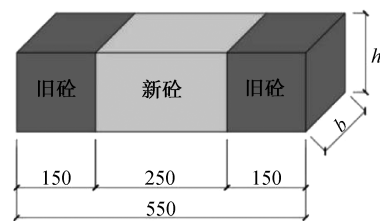


图1 双面直剪试件形状示意图(单位:mm)

Fig. 1 Schematic diagram of the double-sided direct shear specimen (unit:mm)

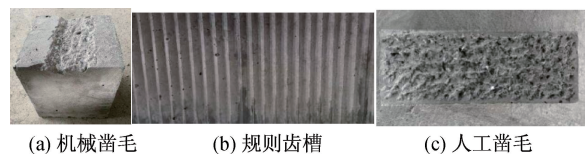


图2 双面直剪试件形状示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the shape of double-sided direct shear specimens

表 1 新旧混凝土界面双面直剪受剪性能尺寸效应试验试件参数

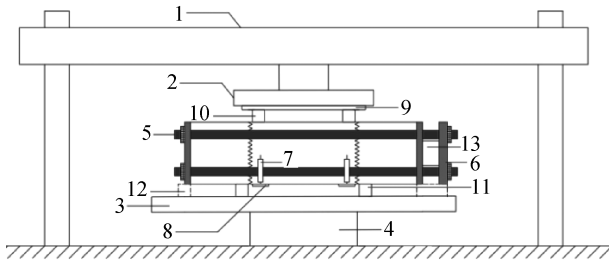
Tab. 1 Size effect test specimen parameters for double-sided direct shear performance of new-old concrete interface

试件编号	界面处理方式	横向约束形式	混凝土强度	界面高度 $h/mm$	每种个数
0-ZW-C30-150	整浇	无约束	C30	150	3
0-ZW-C35-150	整浇	无约束	C35	150	3
1-RW-150-h	人工凿毛	无约束	C35/C30	200/400/600	2
2-JW-150-h	机械凿毛	无约束	C35/C30	100/150/200/300/400/600	2
3-JW-200-h	机械凿毛	无约束	C35/C30	200/600	2
4-JL(A)-150-h	机械凿毛	螺栓自然拧紧	C35/C30	150/200/300/400/600	1
5-JY-150-h	机械凿毛	预压应力 1 MPa	C35/C30	150/200/400/600	1
6-RL-150-h	人工凿毛	螺栓自然拧紧	C35/C30	150/200/300/400/600	1
7-GL-150-h	规则齿槽	螺栓自然拧紧	C35/C30	150/200/400/600	1
8-JL(B)-150-h	机械凿毛	螺栓自然拧紧	C40/C35	150/200/400/600	1

注:新旧混凝土试件编号规则为:组号-界面处理方式与横向约束形式(混凝土强度)-界面宽度-界面高度。整浇试件的编号规则为:组号-界面处理方式与横向约束形式-混凝土强度-正方形界面边长。

1.2 试验装置

双面直剪试验装置如图 3 所示,为了对界面施加横向约束和预压力,设置了简单的约束装置,包括:四个水平螺杆、两端的约束钢板和螺母。其中,右侧的约束钢板为双钢板,之间安装一个力传感器。通过依次多轮旋紧螺母,可得到比较均匀准确的界面压力。



注:1—反力架;2—上压板;3—下压板;4—油缸;  
5—对拉螺杆;6—四角带 22 mm 螺栓孔钢板;7—位移计;  
8—测点触板;9—分配钢板;10—上垫块;11—下垫块;  
12—辅助垫块;13—荷载传感器。

图 3 双面直剪试验加载装置

Fig. 3 Double sided direct shear test loading device

竖向荷载采用 2 000 kN 压力试验机自动加载,首先采用位移-时间控制,以 0.1 mm/s 匀速上升至预压荷载 5 kN,消除试验装置缝隙。正式加载阶段,采用力-时间控制,加载速度为 0.2 kN/s。

1.3 观测内容及方法

观测内容包括:受力过程与破坏形态、时间-滑移关系曲线、时间-荷载关系曲线。时间-荷载数据通过电液万能试验机的配套控制系统采集,时间-滑移数据通过静态数据采集仪和电子位移计采集。数据测得后,对时间-荷载曲线和时间-滑移曲线进行二次处理,得到剪力-滑移曲线;基

于剪力-滑移曲线,得到试件开裂、裂通和破坏三个特征状态时的滑移、荷载和应力;换算得出剪应力-滑移曲线。

2 试验结果

2.1 试验现象

试件表现为两类破坏形式:双面破坏和单面破坏,如图 4 所示。前者现象为:左右界面下部先后出现竖向贯穿裂缝,最后在同一级荷载突然破坏;后者现象为:一侧界面先出现竖向贯穿裂缝后脱开,另一侧始终粘结良好。这种现象显然是由于两侧受力或界面强度的不对称性造成的。

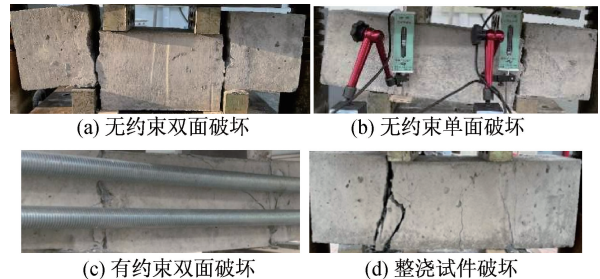


图 4 试件典型破坏形态

Fig. 4 Typical failure modes of the specimen

设置横向约束可显著降低界面不对称影响,并提高界面受剪破坏时的延性。试验中,75%的无侧向约束试件的破坏形态是单侧开裂;而施加有横向约束的试件中,81.25%发生双侧开裂。抗剪界面尺寸小的试件,受不对称荷载时的敏感性越高,越容易发生单侧开裂破坏。

从界面的最终破坏形态来看,无约束双剪构件的界面表现为粘结失效脱开。而有约束试件随着约束应力的增加,摩擦咬合作用增强,表面可看

到剪切引起的碎屑脱落。整浇试件则表现为明显的斜压破坏特征。

## 2.2 剪应力-滑移( $\tau$ - $s$ )曲线

根据试验中得到的  $V$ - $s$  曲线得到各组试件的  $\tau$ - $s$  曲线,如图 5 所示。

从图 5 可知,包括整浇试件在内,无约束试件的  $\tau$ - $s$  曲线为略微下凹的单调增长曲线。分析认为,这是由于加载装置各部件接触面间未压实导致的,从图 5 中可以看出压实应力约为 0.1~0.2 MPa,对应压实荷载为 5~15 kN,对应的滑移为 0.3~1.0 mm 之间。

对于有约束试件,曲线类型则较为复杂,可分为四种类型。第一种:图 5(e)为单调增长曲线,单面破坏时测得。如进行界面滑移刚度分析,这些构件可纳入统计范围,但如果进行强度分析,

显然低估了界面的受剪能力,建议舍去。第二种:图 5(f)的曲线出现在界面上预加压力条件下,界面开裂滑动时,突然应力释放,荷载降低;随后,形成新的界面凹凸咬合并逐渐挤紧,刚度增加,强度提高。第三种:图 5(g)(i)为较低强度时发生几次锯齿形震荡后,抗剪强度增加,这种情况发生在无预应力界面约束条件下,是界面开始局部滑脱的典型表现。第四种:图 5(h)曲线发生在规则齿槽界面,表现为破坏前高应力震荡,随后破坏。这种破坏开始于齿槽的先后剪断开始。

## 2.3 界面特征点应力和滑移

从图 5 曲线中提取各转折特征点应力和位移,得到图 6 和图 7 所示的曲线。其中同一种编号有多个试件时,取平均值。

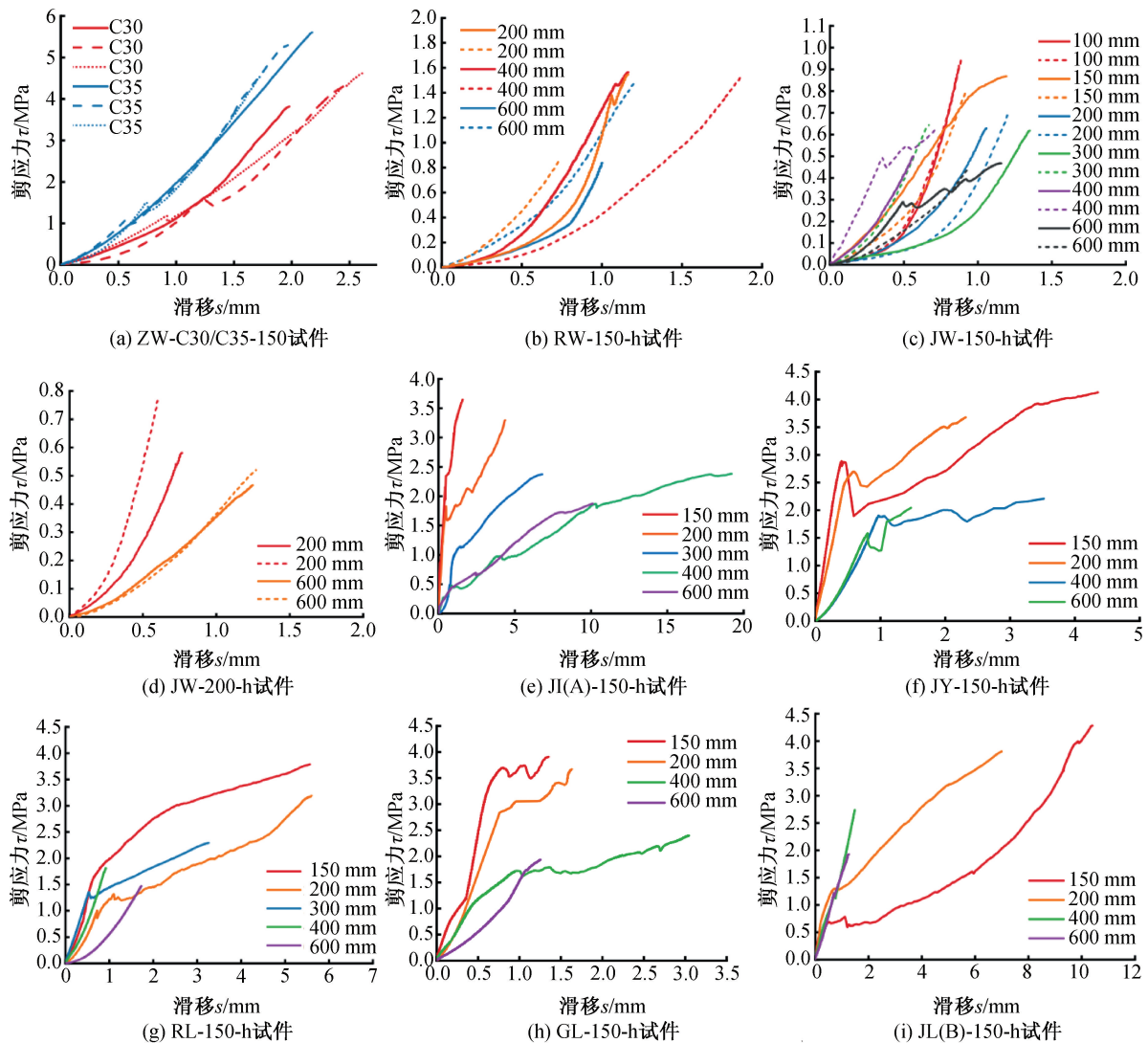


图 5 各组试件的  $\tau$ - $s$  曲线

Fig. 5  $\tau$ - $s$  curves of each group of specimens

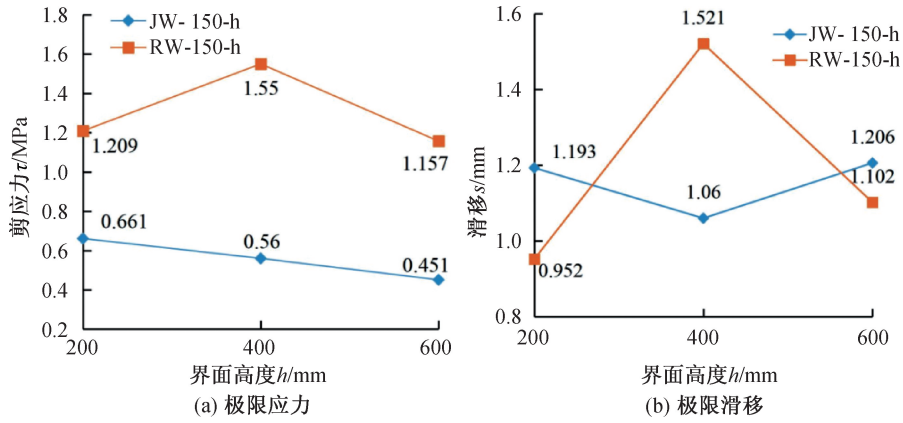


图 6 无横向约束组特征点应力

Fig. 6 Stresses of feature points without lateral constraints

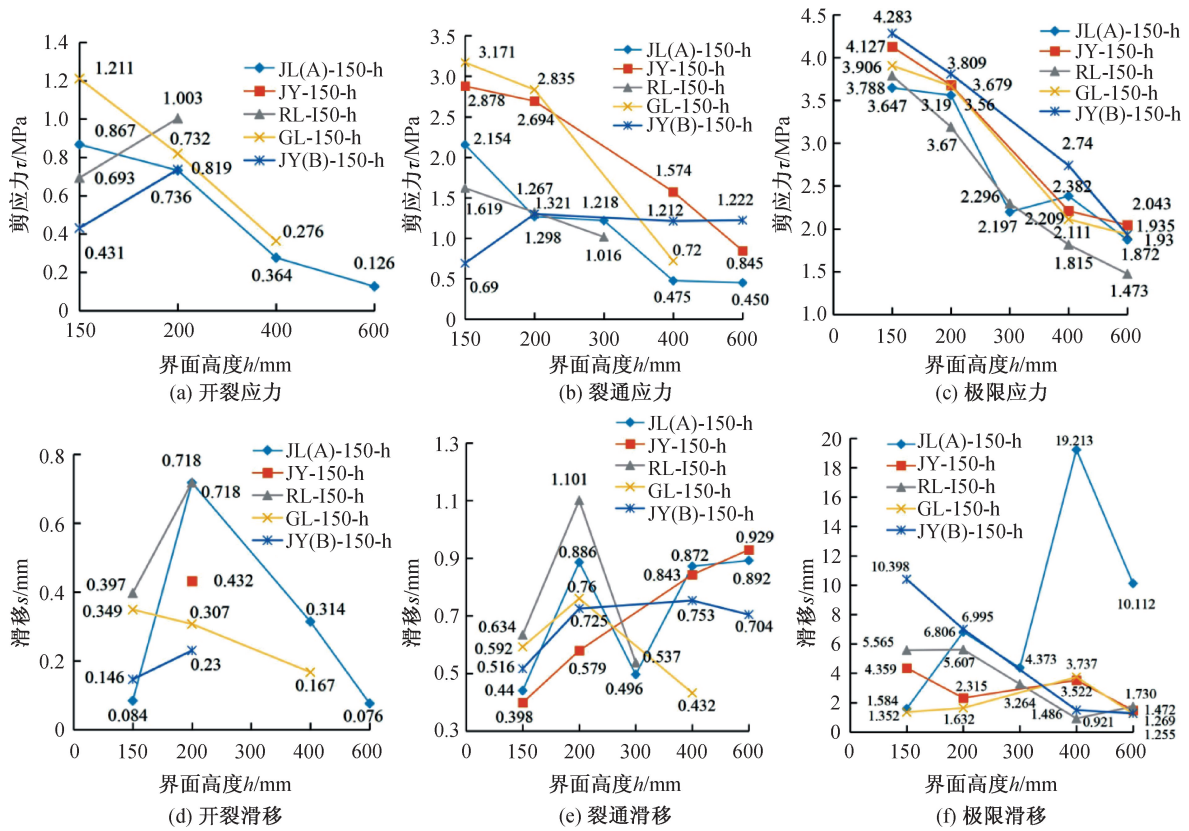


图 7 不同界面处理方式下有横向约束试件的特征点应力和滑移

Fig. 7 Stress and slippage of feature points of specimens with lateral constrained under different interface treatments

由图 6 可以看出:无横向约束时,机械凿毛试件在剪力作用方向上各性能参数存在明显的尺寸效应,随界面高度增大,特征点应力减小,极限应力增大 1.6 倍,滑移值也随界面高度的增加而增加,在宽度方向则影响不明显。分析认为,这种现象表明了界面剪应力分布的显著不均匀性,界面不同位置开裂、破坏不同时发生,界面高度越大,完全破坏时相对滑移值越大,平均应力越低。

由图 6 可以看出:无约束人工凿毛试件中界面高度为 400 mm 试件极限应力明显偏高,检查破坏

面后发现凿毛粗糙度略大。其他各性能参数的尺寸效应并不明显,分析认为是试验系统的离散性远远大于尺寸效应干扰所致。对于有横向约束试件,除个别数据异常外,其特征点应力均呈现随界面高度增大而减小的尺寸效应现象,极限剪应力增幅高达 1.6 倍,但特征点滑移则不明显,参见图 7。

### 3 抗剪强度的参数影响规律

#### 3.1 界面抗剪强度折减系数

研究表明,新旧混凝土界面强度显著低于整

浇试件的直剪强度。以与新旧混凝土界面中较低强度混凝土整浇试件的抗剪强度为基准,定义新旧混凝土界面抗剪强度与整浇试件直剪强度的比值为界面抗剪强度折减系数,图8为各组试件的强度折减系数分布情况。

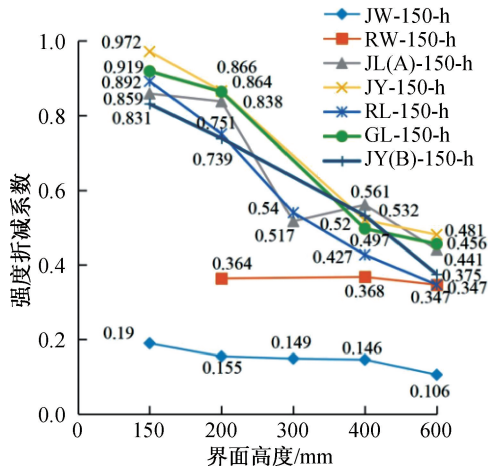


图8 各组试件的强度折减系数

Fig. 8 Strength reduction coefficient of each group of specimens

## 3.2 参数影响分析

### 3.2.1 界面处理方式影响

从图8可以看出,界面无约束时,人工凿毛试件的抗剪强度的强度折减系数随尺寸增大变化不大,范围为0.347~0.364,显著高于机械凿毛试件的界面抗剪强度,其范围在0.1~0.22之间;界面存在预应力约束时,规则齿槽界面的性能明显优于凿毛试件,人工凿毛和机械凿毛相差不大。

### 3.2.2 施加约束和预应力的影响

对比无约束试件,有约束试件的强度折减系数增大了2~2.5倍以上;对比有无预应力的两组带界面约束试件,发现施加预应力对强度折减系数影响并不明显,这表明本试验中各组试件破坏时,界面凹凸咬合效应远远大于摩擦效应。对比两组试件的开裂应力,发现预应力施加能显著提高开裂荷载。

### 3.2.3 混凝土强度的影响

JL(A)、JL(B)两组试件的试验结果表明,随着混凝土强度的提高,界面抗剪强度提高,但其强度折减系数是下降的。

### 3.2.4 界面宽度的影响

试验结果表明,界面宽度的增加对抗剪强度的影响很小,可以忽略其影响。

## 4 界面抗剪强度尺寸效应系数和界面承载力计算

以界面高度为200 mm双剪试件的抗剪强度为基准,定义各试件界面抗剪强度换算系数为尺寸效应系数,参见表2。

新旧混凝土界面双面直剪抗剪强度可表达为

$$\tau \leq \beta_w \beta_h f_i \quad (1)$$

$$\beta_h = \left( \frac{200}{h} \right)^{\varphi_1} \quad (2)$$

式中, $\beta_w$ 为新旧界面处理方式影响系数; $\beta_h$ 为尺寸效应系数, $\varphi_1$ 为尺寸效应敏感性系数; $f_i$ 为旧混凝土轴心抗拉强度实测值,本试验中旧混凝土强度为C30时,实测 $f_i = 2.65$  MPa。

根据试验结果拟合曲线如图9所示,拟合得到的 $\beta_w$ 列入表3中,不同组 $\varphi_1$ 差别很小,约为0.45。受剪承载力试验值、计算值及误差见表4。

最终得到的新旧混凝土双剪试件受剪承载力计算推荐公式:

$$\tau \leq 0.27 \left( \frac{200}{h} \right)^{0.45} f_i (\text{无横向约束}) \quad (3)$$

$$\tau \leq 1.22 \left( \frac{200}{h} \right)^{0.45} f_i (\text{螺栓自然拧紧}) \quad (4)$$

$$\tau \leq 1.32 \left( \frac{200}{h} \right)^{0.45} f_i (\text{有预压应力}) \quad (5)$$

表2 新旧混凝土界面双面直剪抗剪强度尺寸效应系数

Tab. 2 Size effect coefficient of NOCI double-sided direct shear strength of new-old interface

参数组合	界面宽度 $b \times$ 界面高度 $h$ (mm $\times$ mm)					
	150 $\times$ 100	150 $\times$ 150	150 $\times$ 200	150 $\times$ 300	150 $\times$ 400	150 $\times$ 600
JW-150-h	1.41	1.27	1	0.95	0.85	0.68
JL(A)-150-h	—	1.02	1	0.61	0.66	0.52
JY-150-h	—	1.12	1	—	0.61	0.56
RL-150-h	—	1.19	1	0.73	0.57	0.46
GL-150-h	—	1.06	1	—	0.57	0.53
JL(B)-150-h	—	1.12	1	—	0.72	0.51
式(2)值	1.37	1.14	1	0.83	0.73	0.61

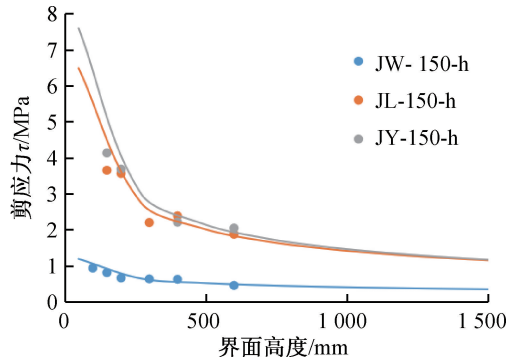


图 9 双剪试件受剪承载力拟合曲线

Fig. 9 Fitting curve of shear capacity of double shear specimens

表 3 拟合公式参数取值

Tab. 3 Parameter values of the fitting formula

参数	JW-150-h	JL(A)-150-h	JY-150-h
$\beta_w$	0.27	1.22	1.32
$\varphi_1$	0.45	0.45	0.45

### 5 结论

本文主要介绍了新旧混凝土尺寸效应双面直剪试验现象,并对试件破坏形态,荷载-滑移曲线以及试件各项特征值进行汇总并分类介绍,对试件极限应力的尺寸效应及其受横向约束形式、凿毛形式、新旧混凝土强度组合的影响进行了详细分析,主要结论如下:

1) 试验中出现 2 类典型的受剪破坏形态,单侧破坏和双侧破坏。单侧破坏由两侧受力或界面

强度的不对称所致,设置横向约束可降低界面不对称影响。

2) 界面宽度一定时,界面高度增加,双剪试件极限应力逐渐减小,存在明显的高度方向上的尺寸效应现象,开裂应力、裂通应力以及滑移的尺寸效应规律不明显;界面宽度的增加对抗剪强度的影响很小,可忽略其影响。

3) 定义新旧混凝土界面抗剪强度与整浇试件直剪强度的比值为界面抗剪强度折减系数,无横向约束条件下,人工凿毛试件强度折减系数随尺寸增大变化不大且显著高于机械凿毛试件;有横向约束条件下,规则齿槽界面性能明显优于凿毛试件,人工凿毛和机械凿毛相差不多。

4) 施加横向约束可提升界面强度。施加预应力对强度折减系数影响并不明显,但可显著提高开裂荷载,这可能是预应力施加较小造成的。

5) 采用高一级新、旧混凝土组合可增加试件裂通应力和极限应力,但提升有限。

6) 对于机械凿毛目标凿毛深度 10 mm 的新旧混凝土双剪试件,受剪承载力按下式计算:

$$\tau \leq 0.27 \left( \frac{200}{h} \right)^{0.45} f_i (\text{无横向约束}),$$

$$\tau \leq 1.22 \left( \frac{200}{h} \right)^{0.45} f_i (\text{螺栓自然拧紧}),$$

$$\tau \leq 1.32 \left( \frac{200}{h} \right)^{0.45} f_i (\text{有预压应力}).$$

表 4 抗剪强度试验值、拟合值结果对比

Tab. 4 Comparison of shear strength test values and fitting values

试件参数组合	$R^2$ (COD)	界面高度/mm	实测值/MPa	计算值/MPa	误差/%
JW-150-h	0.988 6	100	0.932	0.979	5.04
		150	0.808	0.815	0.87
		200	0.660	0.716	8.48
		300	0.631	0.597	-5.39
		400	0.560	0.524	-6.43
		600	0.451	0.437	-3.10
JL(A)-150-h	0.894 4	150	3.647	3.667	0.55
		200	3.560	3.222	-9.49
		300	2.197	2.684	22.17
		400	2.382	2.358	-1.01
		600	1.872	1.965	-4.97
		150	4.127	3.981	-3.54
JY-150-h	0.946 9	200	3.679	3.498	-4.92
		400	2.209	2.561	15.93
		600	2.043	2.134	4.45

## 参考文献:

- [1] KANI G N J. How safe are our large reinforced concrete beams? [J]. *ACI Journal Proceedings*, 1967, 64(31): 128-141.
- [2] CHANA P S. Some aspects of modeling the behavior of reinforced concrete under shear loading [R]. England: Cement and Concrete Association Technical Report, 1981.
- [3] SHIOYA T, TAKAKU A. Estimation of fiber and interfacial shear strength by using a single-fiber composite [J]. *Composites Science and Technology*, 1995, 55(1): 33-39.
- [4] 于磊, 车轶, 宋玉普. 大尺寸钢筋混凝土无腹筋梁受剪试验研究[J]. *土木工程学报*, 2013, 46(01): 1-7.
- [5] 车轶, 于磊. 剪力作用下钢筋混凝土大尺寸无腹筋构件安全性研究[J]. *建筑结构学报*, 2014, 35(02): 144-151.
- [6] WEIBULL W. A statistical theory of the strength of materials[J]. *Proceedings of the American Mathematical Society*, 1939, 151(5): 1034.
- [7] BAZANT Z P. Size effect in blunt fracture: Concrete rock metal [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1984(110): 518-535.
- [8] CARPINTERI A, FERRO G. Apparent tensile strength and fictitious fracture energy of concrete: A fractal geometry approach to related size effects [J]. In: *Fracture and Damage of Concrete and Rock*, Rossmanith, 1993: 86-94.
- [9] HU X, WITTMANN F. Size effect on toughness induced by crack close to free surface [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2000, 65(2-3): 209-221.
- [10] 国家市场监督管理总局. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010(2015 修订版) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 62.
- [11] 王振领, 林拥军, 钱永久. 新老混凝土结合面抗剪性能试验研究 [J]. *西南交通大学学报*, 2005(05): 600-604.
- [12] 赵勇, 邹仁博, 张之璞. 配置高强钢筋的新旧混凝土结合面直剪试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2015, 36(S2): 346-353.
- [13] 袁爱民, 赵雪茹, 陆荣伟. 纤维高强混凝土干接缝剪切性能试验研究 [J]. *中国公路学报*, 2020, 33(08): 159-168.
- [14] DIAB A M, ELMOATY A E M A, ELDIN M R T. et al. Slant shear bond strength between self-compacting concrete and old concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 130: 73-82.
- [15] 高剑平, 潘景龙, 王雨光. 检验新旧混凝土粘结强度合适的试件形式 [J]. *哈尔滨建筑大学学报*, 2001(02): 32-35.
- [16] SOLTANI M R, ROSS B E. Evaluation of a four-point bending-test method for interface shear transfer in concrete members [J]. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 2017, 22(4): 4017008.
- [17] 余振鹏, 黄侨, 李富荣, 等. 混凝土剪切多轴加载试验技术与验证 [J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(02): 460-465.

(责任编辑 王利君)