

高强混凝土新旧结合面抗剪性能试验

赵 勇, 邹仁博

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 进行了 11 个标号 C80 和 4 个标号 C40 混凝土试件的单调推剪试验, 得到了结合面破坏形态、剪力-滑移曲线和剪力-抗剪钢筋应变曲线, 分析了混凝土强度、结合面配筋强度和结合面类型对结合面抗剪性能的影响。收集了 32 组国外试验数据, 对比了高强混凝土结合面受剪承载力试验值与国内外相关标准的计算值。研究表明: 试件出现了结合面剪切和试件混凝土冲切两种破坏模式; 粗糙面 C80 试件的结合面受剪承载力小于 C40 试件, 键槽面试件的结合面受剪承载力高于粗糙面试件; 结合面的受剪承载力与配筋强度成正比; 按照我国《装配式混凝土结构技术规程: JGJ 1—2014》公式计算的 C80 试件受剪承载力与试验值之比在 0.33~0.72 之间, 且相比于国际结构混凝土协会、美国和欧盟规范, 我国规程计算公式偏保守。利用试验数据, 经回归分析, 提出了高强混凝土新旧结合面受剪承载力修正建议计算公式。

关键词: 新旧混凝土结合面; 受剪承载力; 推剪试验; 高强混凝土; 高强钢筋

中图分类号: TU375

文献标志码: A

Experimental Investigation on Interface of High Strength Concretes Cast at Different Times Under Direct Shear

ZHAO Yong, ZOU Renbo

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In this paper, the monotonic direct-shear tests composed of eleven C80 and four C40 concrete push-off specimens were conducted. The failure patterns of specimens, load-slip relation curves, and load-rebar strain relation curves were obtained. The experimental results were analyzed in terms of concrete strength, interface shear rebar strength, and interface types. Afterwards, 32 sets abroad results of interface shear capacity were compared with calculated values using relevant standards at home and abroad. It is found that two failure patterns occur, specifically the

interface shear failure and concrete punch failure. The load of C80 specimens with rough interfaces at their first peaks are lower than those of C40 specimens. Moreover, the load values of specimens with shear keys are larger than those with rough interfaces, and the load increases with interface rebar strength. The ratio of capacity calculated by JGJ 1 and test results is between 0.33 and 0.72. Compared with MC2010, ACI318 and EN1992, JGJ 1 is more conservative. Based on the test results, regression analysis was finished and a modification suggestion calculation formula aimed at interface between high strength concretes was presented.

Key words: interface between concretes cast at different times; shear capacity; push-off test; high strength concrete; high strength rebar

新旧混凝土结合面(以下简称“结合面”) 在混凝土结构中较为常见, 且易形成剪切薄弱面, 比如现浇结构的施工缝、装配式结构的接缝和加固结构中后浇构件的界面等。高强混凝土相比普通混凝土具有更好的结构性能和技术经济效益, 值得在我国推广应用^[1-2]。国内外学者对结合面抗剪性能的试验研究主要针对的是普通混凝土, 但对高强混凝土结合面抗剪性能的研究相对较少。其中, 国外结合面抗剪试验中的混凝土圆柱体抗压强度达到 98.5 MPa^[3-5], 而国内试验的混凝土强度等级标号均未超过 C60^[6-9]。另外, 国内外研究及相关标准对混凝土强度如何影响结合面受剪承载力的认识也并不一致。其中, 文献[3]认为, 提高混凝土强度可提高结合面受剪承载力; 文献[4-5]则指出, 结合面配筋强度较小时, 混凝土强度对受剪承载力影响不明显; 美国《混凝土结构设计规范: ACI 318-14》^[10] (以下简称规范 ACI 318) 在计算结合面受剪承载力时, 未考虑混凝土强度的影响, 而我国《装配式混凝土结构技术规

收稿日期: 2016-09-13

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2011BAJ10B02)

第一作者: 赵 勇(1975—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为装配式混凝土结构。E-mail: yongzhao@tongji.edu.cn

通讯作者: 邹仁博(1991—), 男, 硕士生, 主要研究方向为装配式混凝土结构。E-mail: zrb615@163.com

程:JGJ 1—2014》^[11](以下简称规程 JGJ 1)、欧洲《混凝土结构设计规范:EN 1992-1-1》^[12](以下简称规范 EN 1992)和国际结构混凝土协会的《模式规范:MC 2010》^[13](以下简称规范 MC 2010)均认为,结合面受剪承载力与混凝土强度正相关.因此,有必要对高强新旧混凝土结合面抗剪性能展开研究.本文在推剪试验的基础上,研究直剪作用下高强混凝土新旧结合面的破坏形态以及抗剪机理,分析结合面受剪承载力的影响参数,并与相关标准的计算值进行对比.

1 试验概况

1.1 试件设计

共设计了 15 个 Z 形试件,其中 11 个试件的混凝土强度等级标号为 C80,编号为试件 D1~D11;4 个试件的混凝土强度等级标号为 C40,编号为试件 B1~B4.试件键槽面尺寸、几何尺寸、试件配筋及结合面抗剪钢筋如图 1 和图 2 所示.其中,结合面尺寸为 250 mm×450 mm, A_{ss} 为结合面抗剪钢筋,其锚

固长度均为 325 mm.试件的主要参数见表 1.表中, f_{cu} 为与试件同等条件养护的混凝土立方体抗压强度实测值, f_c 为混凝土轴心抗压强度(根据 f_{cu} 按《混凝土结构设计规范:GB 50010—2010》换算得到), f_y 为钢筋屈服强度实测值, ρ 为结合面抗剪钢筋配筋率, ρf_y 为结合面配筋强度.试件的粗糙面采用露骨料的方法处理而成,试验前,采用灌砂法对结合面粗糙度进行测量,达到规范 MC 2010“粗糙”的要求.

1.2 加载装置

试验采用单调加载,加载装置如图 3 所示,其中后浇部分位于上部.固定于右侧反力架上的 MAS-2000D/500 型伺服作动器施加水平力,在试件左侧放置一个圆形钢棒,作动器中心、结合面和钢棒在同一平面上,通过加载端的铰接装置保证作动器仅施加水平剪力于结合面处.为保证试件牛腿部分的承载力,通过预应力螺杆对其施加了预压力.

1.3 加载方案

正式加载前,先施加约 50 kN 的水平力,对整个系统进行调试后卸载.之后进行分级加载,采用荷载-位移双控制加载.荷载控制时,加载速率为 10 kN

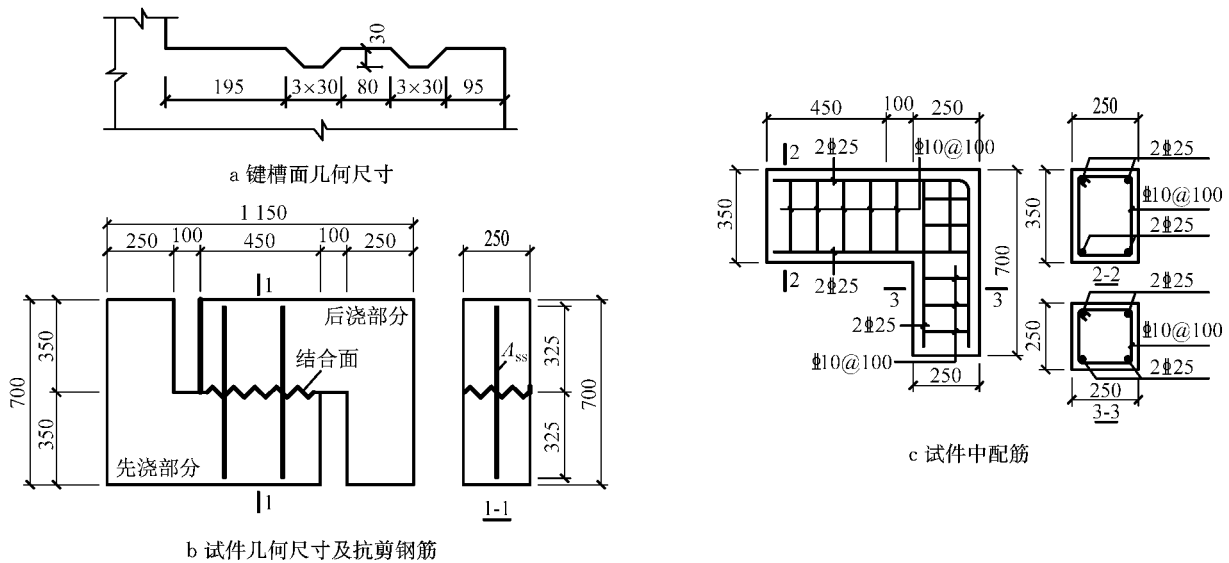


图 1 试件尺寸与配筋(单位:mm)

Fig.1 Dimensions and reinforcement of specimens(unit: mm)

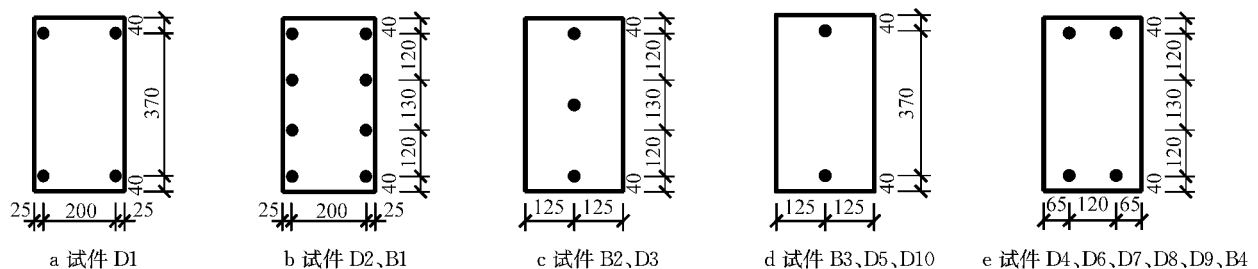


图 2 结合面抗剪钢筋布置(单位:mm)

Fig.2 Arrangement of interface shear resistant rebar (unit: mm)

表 1 试件的主要参数

Tab.1 Main parameters of specimens

编号	结合面类型	$f_{cu}(f_c)/\text{MPa}$		钢筋	结合面抗剪钢筋		
		先浇部分	后浇部分		f_y/MPa	$\rho/\%$	$\rho f_y/\text{MPa}$
D1	粗糙	87.5(71.8)	82.0(67.2)	2×2C10	468	0.28	1.310
D2	粗糙	87.5(71.8)	82.0(67.2)	2×4C10	468	0.56	2.624
D3	粗糙	87.5(71.8)	82.0(67.2)	1×3C16	465	0.54	2.511
D4	粗糙	87.5(71.8)	82.0(67.2)	2×2C16	465	0.71	3.302
D5	粗糙	87.5(71.8)	82.0(67.2)	1×2C25	408	0.87	3.550
D6	粗糙	87.5(71.8)	82.0(67.2)	2×2C25	408	1.74	7.100
D7	键槽	87.5(71.8)	82.0(67.2)	2×2C16	465	0.71	3.302
D8	键槽	87.5(71.8)	82.0(67.2)	2×2C25	408	1.74	7.100
D9	粗糙	87.5(71.8)	82.0(67.2)	2×2D16	530	0.71	3.763
D10	键槽	87.5(71.8)	82.0(67.2)	1×3D16	530	0.54	2.862
D11	键槽	87.5(71.8)	82.0(67.2)	1×2D25	532	0.87	4.628
B1	粗糙	52.1(42.7)	49.9(40.9)	2×4C10	468	0.56	2.624
B2	粗糙	52.1(42.7)	49.9(40.9)	1×3C16	465	0.54	2.511
B3	粗糙	52.1(42.7)	49.9(40.9)	1×2C25	408	0.87	3.550
B4	键槽	55.4(45.4)	49.9(40.9)	2×2C25	408	1.74	7.100

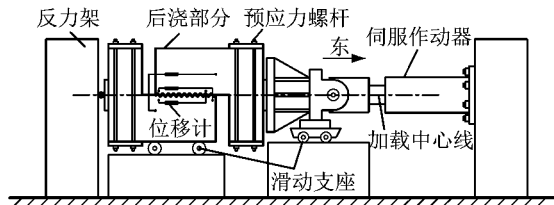


图 3 试验加载装置及结合面滑移测点布置示意

Fig. 3 Test setup and layout of interface slide measuring-points

• min^{-1} . 结合面达到第一峰值荷载时滑移量较小, 且之后荷载会突降, 为防止试件突然破坏, 当钢筋应变达到 1.5×10^{-3} 或结合面裂缝贯通后, 改为位移控制加载. 位移控制时, 加载速率为 $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, 直至结合面两侧相对滑移量达到 25 mm 或荷载降为第一峰值荷载的 30% 时, 认为试件破坏, 加载终止.

1.4 量测内容

每个试件中安装有 3 个位移计, 用以测量结合面的相对滑移量(见图 3). 每个试件上选取 2~3 根抗剪钢筋, 并在结合面上、下各 25 mm 处布置钢筋应变测点. 试验过程中, 还采用裂缝电子读数仪测量结合面的裂缝宽度.

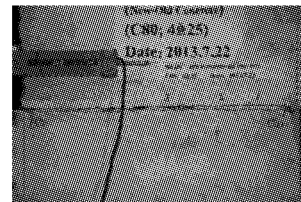
2 试验结果与分析

2.1 破坏过程

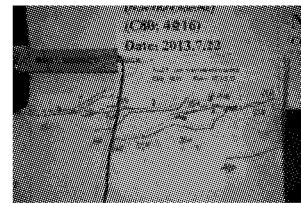
当荷载达到 250 kN 左右时, C80 试件结合面开裂, 而当加载到 350 kN 左右时, C40 试件结合面方开裂. 高强混凝土由于使用了更多的高标号水泥, 水化放热更高, 早期自收缩加大, 可能在试件内部产生微裂缝, 从而导致 C80 试件的开裂荷载低于 C40

试件.

加载到第一峰值荷载时, 所有试件的结合面裂缝贯通(见图 4a), 键槽结合面试件 D7、D8 和 B4 出现沿键槽表面发展的斜裂缝(见图 4b), C80 和 C40 试件的结合面平均裂缝宽度分别达到 0.4 mm 和 0.5 mm.



a 结合面裂缝贯通(试件 D6)



b 键槽结合面斜裂缝(试件 D7)

图 4 达到第一峰值荷载时典型的结合面裂缝形态

Fig.4 Typical crack patterns at the first peak load

加载至试件破坏时, 结合面出现较大的滑移, 出现了两种破坏方式. 其中, 试件 D3、D4、B2 和 B3 发生结合面剪切破坏, 试件结合面附近混凝土有少量剥落(见图 5a、b); 其余发生混凝土冲切破坏, 试件 D1、D2 和 B1 发生正面混凝土冲切破坏, 试件正面的混凝土大面积脱落(见图 5c), 试件 D5、D6、D8 和 B4 发生侧面混凝土冲切破坏, 试件角部出现斜裂缝, 大块混凝土被整体剥离(见图 5d).

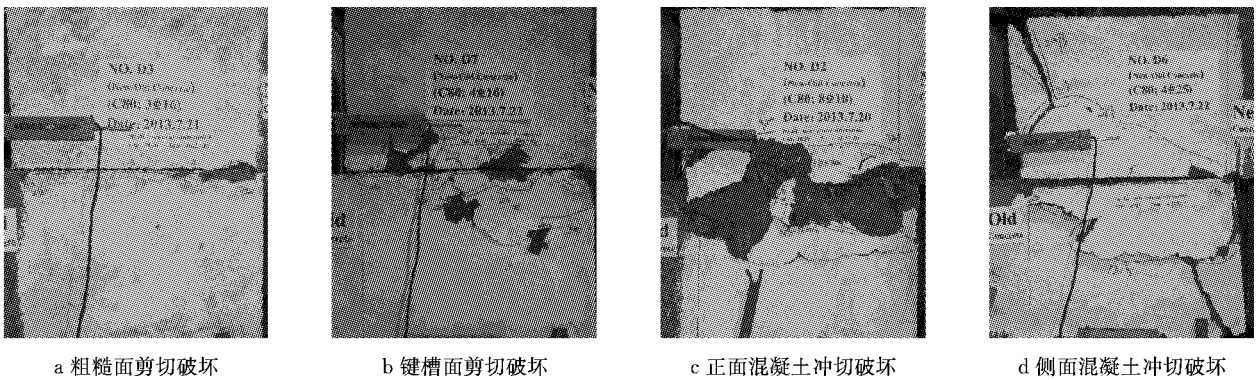


图 5 典型的试件破坏形态

Fig.5 Typical failure patterns of specimens

2.2 剪力-滑移曲线

典型的试件结合面剪力-滑移($V-s$)曲线如图 6 所示. 试件开裂前, 结合面无相对滑移; 结合面开裂后, 荷载随结合面滑移量的增加而迅速增大, 达到第一峰值荷载时, 所有试件的结合面滑移量均未超过 0.6 mm; 之后, 试件的荷载随滑移量的增加而降低; 最后, 试件出现了两种破坏情况, 其中, 配置直径 25 mm 钢筋的试件, 由于混凝土保护层厚度较小, 在钢筋的局部压力作用下而发生冲切破坏, 荷载迅速降低, 而其他试件的荷载随滑移量的增加而缓慢增大, 直至达到第二峰值荷载, 之后荷载迅速降低.

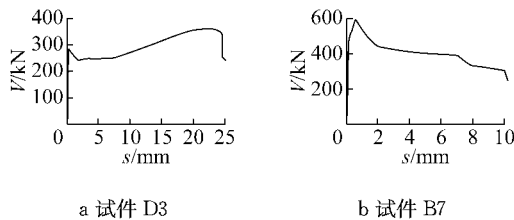


图 6 典型的试件 $V-s$ 曲线

Fig.6 Typical $V-s$ curves of specimens

由图 6 可以看出, 结合面的 $V-s$ 曲线大致呈 4 折线^[14], 其 4 个特征点分别代表试件开裂、第一峰值荷载、荷载下降拐点和第二峰值荷载, 如图 7 所示. 图中, V_1 和 s_1 为结合面开裂荷载和滑移量, V_2 和 s_2 为第一峰值荷载和相应的结合面滑移量, V_3 和 s_3 为第一个荷载下降段达到的最小荷载和相应的结合面滑移量, V_4 和 s_4 为第二峰值荷载及相应的结合面滑移量. 各试件特征点对应的剪力和相对滑移量如表 2 所示. 由表 2 可知, 达到第一峰值荷载时, 结合面滑移量很小, 多数不超过 0.5 mm, 主要由混凝土的黏锁作用和剪摩擦作用共同提供结合面受剪承载力, 钢筋销栓作用的影响相对较小. 之后, 由于结合面混凝土粗骨料被剪坏, 混凝土黏锁作用和剪摩擦作用突降, 导致荷载突降. 但随着结合面滑移量增大, 钢

筋销栓作用增大, 荷载缓慢回升并出现第二个峰值荷载. 但达到第二峰值荷载时, 结合面滑移量较大且开裂严重, 不适合作为承载力指标. 另外, 文献[15]认为, 在地震设计工况下, 框架梁端、柱端的施工缝结合面可能出现较大的滑移量, 为此提出了采用基于滑移量的结合面受剪承载力计算方法, 并建议取结合面相对滑移量为 2.0mm 时对应的剪力 $V_{2.0}$ 作

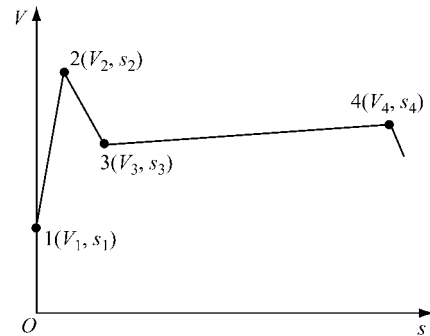


图 7 结合面 $V-s$ 曲线示意图

Fig.7 Interface $V-s$ curves

表 2 各试件试验特征点结果

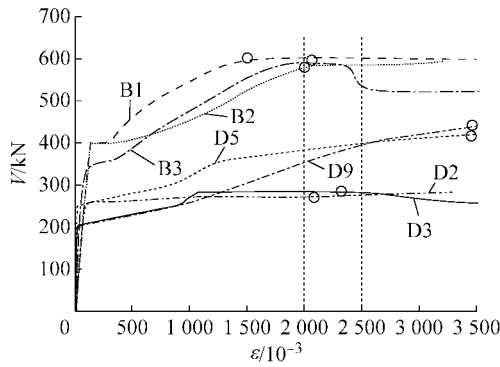
Tab.2 Test results of specimens

试件编号	V_1 /kN	V_2 /kN	s_2 /mm	V_3 /kN	s_3 /mm	V_4 /kN	s_4 /mm	$V_{2.0}$ /kN
D1	250	277	0.20	140	9.00	163	26.0	260
D2	250	277	0.3	243	1.02	367	23.0	247
D3	250	285	0.4	250	1.81	363	23.0	240
D4	200	365	0.2	318	3.02	462	20.0	315
D5	257	419	0.2	374	3.10	490	25.0	374
D6	200	689	0.4					632
D7	250	780	0.4	470	5.52	539	24.0	552
D8	200	1 227	0.4					1 212
D9	250	443	0.2	390	8.14	540	25.0	387
D10	250	861	0.4	380	7.10	410	20.0	358
D11	171	870	0.5					593
B1	400	600	0.6	290	12.42	344	20.7	580
B2	350	590	0.1	329	6.70	355	10.5	580
B3	350	584	0.4					439
B4	300	778	0.5					562

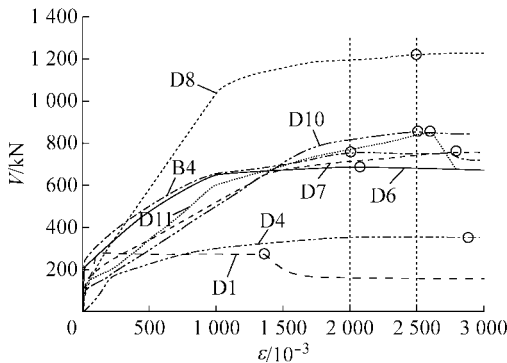
为结合面受剪承载力. 由于国内外相关试验数据仍较少, 基于滑移量的结合面受剪承载力计算方法尚有待进一步研究. 故本文将第一峰值荷载定义为结合面的受剪承载力 V_u .

2.3 剪力-抗剪钢筋应变关系

试件中部分钢筋的剪力-抗剪钢筋应变($V-\epsilon$)的关系曲线如图 8 所示. 图中, 圆圈代表 V_u . 由图 8 可知, 达到 V_u 前, 试件的 $V-\epsilon$ 曲线均大致呈 3 折线. 结合面开裂前, 荷载与钢筋应变呈线性关系, 钢筋应变较小, 均小于 0.2×10^{-3} ; 开裂后, 钢筋应变随荷载的增长而迅速变大; 达到 V_u 时, 除试件 D1、B1 外, 其余试件中的钢筋均屈服.



a 试件 D2、D3、D5、D9、B1~B3



b 试件 D1、D4、D6、D7、D8、D10、D11、B4

图 8 荷载-钢筋应变关系

Fig.8 Load versus strain

3 结合面抗剪性能影响因素分析

3.1 混凝土强度的影响

如图 9 所示, 通过对比配筋强度相同的粗糙面试件 D2 与 B1、试件 D3 与 B2、以及试件 D5 与 B3, 可以看出: 粗糙面 C80 试件的 V_u 低于 C40 试件, 其中试件 D2 比试件 B1 小 53.8%, 试件 D3 比试件 B2 小 51.7%, 试件 D5 比试件 B3 小 28.3%. 对于高强混凝土, 当骨料强度低于水泥砂浆强度时, 裂缝会穿

过骨料, 形成比较光滑的结合面, 将会降低剪摩擦作用和混凝土的黏锁作用^[16-17], 从而导致粗糙面 C80 试件的 V_u 低于 C40 试件.

由图 9 还可看出: 达到第一峰值荷载后, C80 试件受剪承载力下降幅度小于 C40 试件. 这主要是因为, 当结合面有较大滑移后, 钢筋销栓作用对结合面的承载力贡献增大, 对混凝土会产生局部压力, 而 C80 混凝土具有更高的局部压力承载能力.

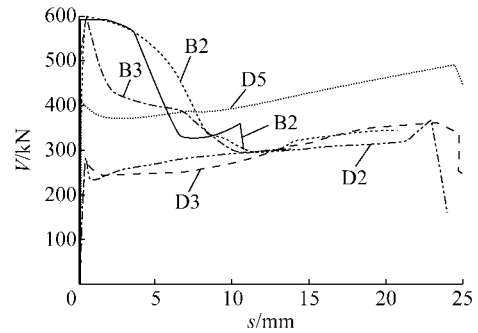
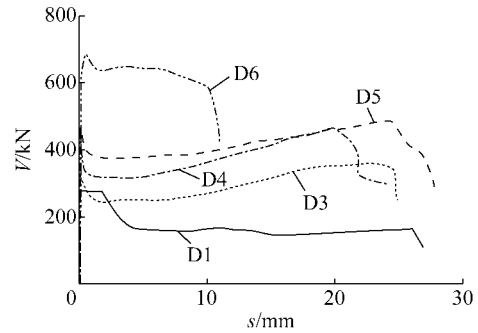


图 9 混凝土强度对 V-s 曲线的影响

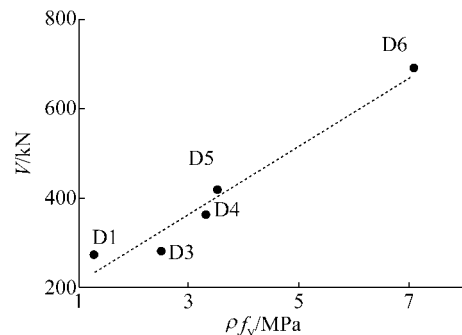
Fig.9 Influences of concrete strength on V-s curves

3.2 结合面配筋强度的影响

如图 10 所示, 通过对比粗糙结合面试件 D1、D3~D6 可知: 达到 V_u 时, 荷载随配筋强度的增大而增大, 且 V_u 与配筋参数呈近似线性关系 (见图 10b).



a 结合面配筋强度对 V-s 曲线的影响



b 受剪承载力与配筋强度的关系

图 10 结合面配筋强度对受剪承载力的影响

Fig.10 Influences of interface reinforcement parameter on interface shear capacity

值得注意的是,试件 D6 的结合面滑移量比其余试件约小 60%,这主要是因为其抗剪钢筋直径较大且混凝土保护层厚度较小,在销栓作用下发生了试件侧边混凝土保护层冲切破坏。

3.3 结合面类型的影响

如图 11 所示,通过对比配筋强度相同的试件 D4 与 D7、D6 与 D8 可知:键槽结合面试件的 V_u 比粗糙结合面试件大,其中试件 D7 比 D4 的大 113.7%,试件 D8 比 D6 的大 78.1%;达到 V_u 后,键槽结合面试件 D7、D8 承载力下降幅度明显大于设置粗糙结合面的试件 D4、D6,滑移量达到 4.0 mm 时,键槽面试件 D7、D8 的承载力分别下降了 39.0%、33.5%,粗糙面试件 D4、D6 的承载力仅下降了 13.2%、6.3%(如图 12 所示),但此时键槽面试件的承载力仍高于粗糙面试件。

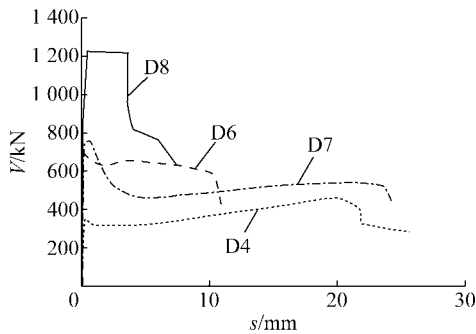


图 11 结合面类型对 V-s 曲线的影响

Fig.11 Influences of interface technics on V-s curves

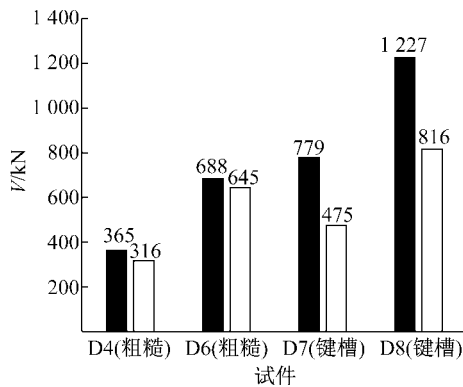


图 12 承载力下降幅度对比

Fig.12 Comparison of shear capacity descending range

4 极限承载力计算方法

4.1 承载力计算值与试验值的对比

我国规程 JGJ 1、模式规范 MC 2010、美国规范 ACI 318 和欧盟规范 EN 1992 均给出了新旧混凝土结合面受剪承载力计算方法。直剪作用下,规程 JGJ

1 对框架梁端竖向接缝结合面,考虑了键槽的抗剪作用和抗剪钢筋的销栓作用;规范 MC 2010 对粗糙或非常粗糙结合面,考虑了混凝土的黏锁作用、剪摩擦作用和抗剪钢筋的销栓作用;规范 ACI 318 对粗糙结合面仅考虑剪摩擦作用;规范 EN 1992 对粗糙结合面,考虑了混凝土的黏锁作用和剪摩擦作用。各标准中的受剪承载力计算公式如下:

$$V_{u,JGJ} = 0.1f_c A_k + 1.65A_{sd}\sqrt{f_c f_y} \quad (1)$$

$$V_{u,MC} = 0.1f_c'^{1/3} A_c + 0.5A_{sd}f_y + 0.9A_{sd}\sqrt{f_{cc}f_y} \quad (2)$$

$$V_{u,ACI} = 1.0A_{sd}f_y \quad (3)$$

$$V_{u,EN} = 0.45f_t A_c + 0.7A_{sd}f_y \quad (4)$$

式(1)~(4)中: f_c 为结合面两侧混凝土轴心抗压强度的较小值; f_t 为结合面两侧混凝土轴心抗拉强度的较小值; f_{cc} 为结合面两侧混凝土圆柱体轴心抗压强度的较小值; f_y 为钢筋屈服强度实测值; A_k 为各键槽的根部截面面积之和; A_{sd} 为垂直贯穿结合面钢筋的面积; A_c 为结合面面积。 f_{cc} 计算按《普通混凝土力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2002》测得与试件同条件养护的混凝土立方体抗压强度值^[18],根据《混凝土结构设计规范:GB 50010—2010》给出的立方体抗压强度与棱柱体抗压强度的关系,换算得到轴心抗压强度^[19],再根据欧洲标准《混凝土结构设计的一般规则和构造:EN1992-1-1》得到了相应的圆柱体轴心抗压强度。

将按式(1)~(4)计算的结合面受剪承载力计算值和试验值进行对比,列于表 3。从表中可以看出,按规程 JGJ 1 计算的结合面受剪承载力明显低于试验值, $V_{u,JGJ}/V_u$ 在 0.33~0.72 之间,平均值为 0.61;按规范 MC 2010 和规范 ACI 318 计算的试件受剪承载力与试验值接近, $V_{u,MC}/V_u$ 和 $V_{u,ACI}/V_u$ 分别平均为 0.93 和 0.90;而按规范 EN 1992 计算的粗糙面试件受剪承载力大于试验值, $V_{u,EN}/V_u$ 平均为 1.42;键槽面试件受剪承载力均小于试验值, $V_{u,MC}/V_u$ 、 $V_{u,ACI}/V_u$ 和 $V_{u,EN}/V_u$ 平均值分别为 0.53、0.57 和 0.89。另外,按式(1)计算的键槽面和粗糙面试件的 $V_{u,JGJ}/V_u$ 平均值分别为 0.65 和 0.59,说明式(1)低估了粗糙面的抗剪作用。

收集整理了文献[3-5]中关于高强混凝土结合面抗剪试验数据,共 32 个粗糙面试件。混凝土的圆柱体抗压强度范围为 70.0~123.4 MPa(相当于 f_{cu} 在 78.6~138.7 MPa^[18]),配筋强度的范围为 2.1~8.4 MPa,试件的加载方式包括单向和循环往复两种。

表 3 受剪承载力计算值与试验值的比较

Tab.3 Comparison of shear strength between calculated values and test results

试件编号	V_u	$V_{u,JGJ}$	$V_{u,JGJ}/V_u$	$V_{u,MC}$	$V_{u,MC}/V_u$	$V_{u,ACI}$	$V_{u,ACI}/V_u$	$V_{u,EN}$	$V_{u,EN}/V_u$
D1	277	92	0.33	170	0.61	147	0.53	443	1.60
D2	277	185	0.67	294	1.06	295	1.06	547	1.97
D3	285	177	0.62	284	1.00	282	0.99	538	1.89
D4	365	232	0.64	358	0.98	371	1.02	600	1.64
D5	419	250	0.60	382	0.91	399	0.95	620	1.48
D6	689	499	0.72	718	1.04	799	1.16	899	1.30
D7	780	535	0.69	405	0.46	371	0.48	712	0.91
D8	1 227	802	0.65	764	0.59	799	0.65	1 097	0.89
D9	443	249	0.56	393	0.89	265	0.60	637	1.44
D10	861	492	0.57	310	0.36	201	0.23	668	0.78
D11	870	608	0.70	473	0.54	326	0.37	847	0.97

按式(1)~(4)计算的结合面受剪承载力计算值和试验值与配筋强度的关系如图 13 所示. 由图可知:按式(1)和式(2)的计算值均比试验值小,其中, $V_{u,JGJ}/V_u$ 的平均值为 0.38, $V_{u,MC}/V_u$ 的平均值为 0.53, $V_{u,ACI}/V_u$ 的平均值为 0.55, $V_{u,EN}/V_u$ 的平均值为 0.60.

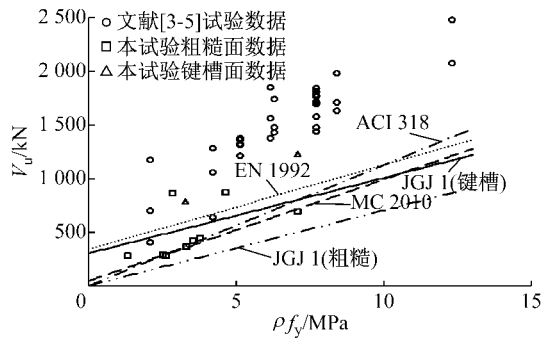


图 13 试验结果与规范计算值对比

Fig.13 Comparisons between test results and standard results

4.2 承载力计算公式修正建议

由于未考虑粗糙面的有利影响,也未综合考虑剪摩擦和钢筋销栓的共同作用,规程 JGJ 1 的计算公式低估了高强混凝土结合面受剪承载力. 利用收集到的 42 个样本数据,进行了回归分析,可以得到结合面受剪承载力计算公式为

$$V_{ur} = 0.02f_c A_c + A_{sd} f_y + 1.2A_{sd} \sqrt{f_c f_y} \quad (5)$$

按式(5)计算的结合面受剪承载力计算值 V_{ur} 和试验值 V_u 与配筋强度的关系如图 14 所示. 由图可知, V_{ur}/V_u 的平均值为 0.95, 变异系数为 0.397, 与试验数据符合较好.

由于试验数据较少,还有待于通过更多的数据和可靠度分析来建立结合面受剪承载力设计计算公式.

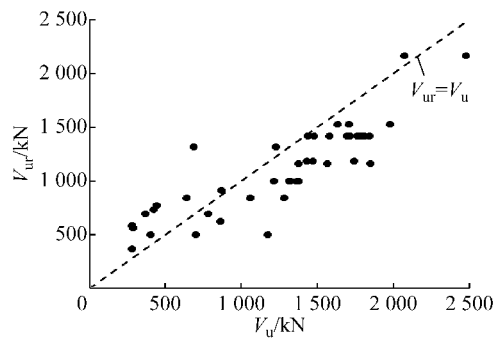


图 14 试验结果与修正公式计算值对比

Fig.14 Comparisons between test results and modified formula results

5 结论

(1) 使用 C80 混凝土的 Z 形直剪试件先于使用 C40 混凝土的 Z 形试件开裂;试件有两种破坏形态,一种为混凝土保护层冲切破坏,另一种为结合面剪切破坏.

(2) 使用 C80 混凝土的粗糙结合面试件的结合面受剪承载力低于 C40 粗糙结合面试件;其他条件相同时,键槽面试件的结合面受剪承载力高于粗糙面试件,且结合面的受剪承载力随结合面配筋强度参数的增大而增大.

(3) 按规程 JGJ 1—2014 公式计算的受剪承载力均明显小于试验值,二者比值平均为 0.61, C80 试件按规程 JGJ 1—2014 公式计算的受剪承载力与试验值之比在 0.33~0.72 之间,按规程 JGJ 1—2014 的计算结果仍具有较高安全度.

(4) 建议计算结合面受剪承载力时,综合考虑混凝土黏锁作用、剪摩擦作用和钢筋销栓作用的有利影响. 根据试验结果,本文提出了高强混凝土新旧结合面受剪承载力修正建议公式,与试验数据符合较好.

参考文献:

- [1] 赵唯坚. 超高强材料与装配式结构[J]. 工程力学, 2012, 29(增2): 31.
ZHAO Weijian. Ultra-high strength materials and precast concrete structures[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(S2): 31.
- [2] 黄小坤, 田春雨. 预制装配式混凝土结构研究[J]. 住宅产业, 2010(9): 28.
HUANG Xiaokun, TIAN Chunyu. Research of precast concrete structures[J]. Housing Industry, 2010(9): 28.
- [3] WALRAVEN J C, FRENAY J, PRUIJSSERS A. Influence of concrete strength and load history on the shear friction capacity of concrete members[J]. PCI Journal, 1987, 32(1): 66.
- [4] MATTOCK A H, HAWKINS N M. Shear transfer in reinforced concrete-recent research[J]. PCI Journal, 1972, 17(2): 55.
- [5] KAHN L F, MITCHELL A D. Shear friction tests with high-strength concrete [J]. ACI Structural Journal, 2002, 99(1): 98.
- [6] 胡铁明, 黄承逵, 陈小锋. 构造钢筋影响下新老混凝土结合面抗剪试验研究[J]. 混凝土, 2009(3): 26.
HU Tieming, HUANG Chengkui, CHEN Xiaofeng. Experimental research on shear of bonding interface between young and old concrete influenced by constructional reinforcement[J]. Concrete, 2009(3): 26.
- [7] 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, 40(5): 600.
WANG Zhenling, LIN Yongjun, QIAN Yongjiu. Experimental research on shear properties of new-to-old concrete interface [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2005, 40(5): 600.
- [8] 靳利娜, 王山山, 任青文, 等. 新老混凝土结合面抗剪性能试验研究[J]. 实验力学, 2014, 29(5): 611.
JIN Li'na, WANG Shanshan, REN Qingwen, *et al.* Experimental research on shear properties of new-to-old concrete interface [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(5): 611.
- [9] 聂建国, 陈必磊, 陈戈, 等. 钢筋混凝土叠合板的试验研究[J]. 工业建筑, 2003, 33(12): 43.
NIE Jianguo, CHEN Bilei, CHEN Ge, *et al.* Experimental study on shear behavior of R. C. laminated slabs[J]. Industrial Construction, 2003, 33(12): 43.
- [10] American Concrete Institute. Building code requirement for structural concrete (ACI 318-14) and commentary: ACI 318R-14[S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2014.
- [11] 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: JGJ 1—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for precast concrete structures: JGJ 1—2014 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997.
- [12] European Committee for Standardization. Eurocode No. 2: design of concrete structures-part 1-1: general rules and rules for building[S]. London: British Standards Institution, 2004.
- [13] The International Federation for Structural Concrete (fib). Model code 2010[S]. Lausanne: The International Federation for Structural Concrete, 2012.
- [14] 张之璞. 钢筋混凝土结合面直剪性能试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2014.
ZHANG Zhipu. Experimental research on the direct shear performance of interfaces in reinforced concrete and precast concrete[D]. Shanghai: Tongji University, 2014.
- [15] 社团法人预制建筑协会. 预制建筑总论[M]. 朱邦范, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Association of the Society for the Precast Construction. General of precast building[M]. Translated by ZHU Bangfan. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [16] TAYLOR R. A Note on the Mechanism of diagonal cracking in reinforced concrete beams without web reinforcement [J]. Magazine of Concrete Research, 1959, 11(31): 151.
- [17] WALRAVEN J C, REINHARD H W. Theory and experiments on the mechanical behavior of cracks in plain and reinforced concrete subjected to shear loading[J]. Heron, 1981, 26(1A): 1.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete: GB/T 50081—2002[J]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete buildings: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.