

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.051

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



配置高强抗剪钢筋的混凝土整浇界面直剪性能试验研究

刘杰^{a,b}, 邱磊^a, 张杨^a, 陈娟娟^a, 周万清^a

(三峡大学 a. 土木与建筑学院; b. 防灾减灾湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

摘要:为研究抗剪钢筋的屈服强度 f_y 和混凝土保护层厚度 h 对混凝土整浇界面直剪性能的影响,开展了12个Z形试件推出式试验。基于试验现象和界面实测的荷载-滑移曲线,提出界面剪力传递机理。根据试件的承载力测试值,对规范ACI、PCI以及AASHTO的界面直剪承载力计算公式进行评估分析。结果表明:当 f_y 由400 MPa提高至600 MPa或 h 由20 mm增加至40 mm时,界面的直剪强度和刚度均无显著变化,但 h 的变化会引起界面破坏模式的改变;混凝土的粘结力和内聚力对界面直剪承载力的贡献较大;3个规范的计算公式都能较好地应用于工程设计,但ACI和PCI计算公式过于保守,AASHTO计算公式的计算精度较高。

关键词:混凝土界面;直剪性能;高强钢筋;混凝土保护层;推出式试验

中图分类号: TU317 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2020)04-0077-07

Experimental study on direct shear behavior of monolithically cast concrete interfaces with high-strength shear reinforcements

LIU Jie^{a,b}, QIU Lei^a, ZHANG Yang^a, CHEN Juanjuan^a, ZHOU Wanqing^a

(a. College of Civil Engineering & Architecture; b. Hubei Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, P. R. China)

Abstract: In order to study the influence of the yield strength f_y of the shear reinforcement and the concrete cover thickness h on the direct shear performance of the monolithically cast concrete interface, a push-out test of 12 Z-shaped specimens was carried out. Based on the experimental phenomenon and the measured load-slip curve of the interface, the interface shear force transfer mechanism was revealed. According to the test value of the bearing capacity of the specimens, the calculation formulas of the interface direct shear bearing capacity of the standard ACI, PCI and AASHTO were evaluated and analyzed. The results show that when f_y increases from 400 MPa to 600 MPa or h increases from 20 mm to 40 mm, the direct shear

收稿日期: 2020-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(51641807);湖北省自然科学基金(2018CFB664);防灾减灾湖北省重点实验室(三峡大学)开放基金(2018KJZ06);宜昌市大学应用基础研究项目(A18-302-a14)

作者简介: 刘杰(1984-),男,博士,副教授,主要从事混凝土结构研究, E-mail: werewolves@163.com。
周万清(通信作者),男,博士,副教授, E-mail: zhouwq1978@163.com。

Received: 2020-03-10

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51641807); Natural Science Foundation of Hubei Province (No. 2018CFB664); Open Research Fund Project of Hubei Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation (China Three Gorges University) (No. 2018KJZ06); University Applied Basic Research Project of Yichang City (No. A18-302-a14)

Author brief: LIU Jie (1984-), PhD, associate professor, main research interest: concrete structure, E-mail: werewolves@163.com.

ZHOU Wanqing (corresponding author), PhD, associate professor, main research interest: concrete structure, E-mail: zhouwq1978@163.com.

strength and stiffness of the interface do not change significantly, while the change of h will cause the different interface failure modes; The cohesive force of concrete has a great contribution to the direct shear bearing capacity of the interface; The three standard calculation formulas can be applied to engineering design, while the ACI and PCI calculation formulas are too conservative, and the AASHTO calculation formula is of great accuracy.

Keywords: concrete interface; direct shear behavior; high-strength reinforcement; concrete cover; push-off test

钢筋混凝土构件在材料或几何不连续处容易发生界面直剪破坏,实际工程中,牛腿根部、剪力墙的施工缝以及空心板桥的后浇铰缝等部位的界面直剪破坏屡见不鲜^[1]。对于界面直剪破坏,美国的混凝土规范 ACI^[2]、混凝土设计手册 PCI^[3]以及桥梁规范 AASHTO^[4]都专门在“shear-friction”节给出了界面的直剪承载力计算条款,根据这 3 个规范和相关资料^[5],钢筋混凝土直剪破坏界面可分为 3 类:整体浇筑未预裂界面(以下简称“整浇界面”)、整体浇筑预裂界面(以下简称“预裂界面”)和不同时间浇筑形成的新老混凝土界面。近年来,研究者针对这 3 类直剪破坏界面的研究取得了丰富的成果,研究内容涉及高强抗剪钢筋(Harries 等^[6]、Barbosa 等^[7])、高强或高性能混凝土(Kahn 等^[8]、Wu 等^[9])、轻质混凝土(Sneed 等^[10])和再生混凝土(Xiao 等^[11])等。

实际工程中,高强钢筋的应用日益广泛,但需要指出的是,高强抗剪钢筋的配置能否提高直剪破坏界面的直剪承载力目前尚不明确。卢海霞等^[12]利用 Z 形试件,研究了屈服强度为 500 MPa 的高强抗剪钢筋对整浇界面直剪性能的影响,结果表明,与配置 HRB400 钢筋的试件相比,配置 HRB500 钢筋的试件的直剪承载力提高了 2%~8%。同时,上述 3 个规范在计算界面直剪承载力方面存在一些明显的差异,主要表现在 ACI 和 PCI 未考虑混凝土对界面直剪承载力的贡献,而 AASHTO 考虑了这种贡献,为了更好地指导工程设计,有必要对各规范条款进行评估分析。此外,《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T 50476—2008)^[13]针对不同的环境等级、设计使用年限及构件部位,规定了钢筋的最小混凝土保护层厚度范围为 20~45 mm。Liu 等^[5]和 Kahn 等^[8]的研究表明,抗剪钢筋混凝土保护层厚度会影响新老混凝土界面的破坏模式,但其对整浇界面直剪性能(尤其是直剪强度)有何影响,还有待深入探究。

基于此,笔者进行了 12 个 Z 形试件推出式试验,研究了抗剪钢筋的屈服强度和混凝土保护层厚度对整浇界面直剪性能的影响,基于试验结果分析了界面的剪力传递机理,对 ACI、PCI 和 AASHTO 规范设计条款的适用性和经济性进行了比较。

1 试验概况

1.1 试件设计及试验方案

Z 形推出式试件的几何尺寸、配筋情况如图 1 所示。为了研究抗剪钢筋的屈服强度 f_y 和混凝土保护层厚度 h 对整浇界面直剪性能的影响,共设计了 4 组 Z 形试件:ZC5N2 组、ZC5N4 组、ZC5T2 组和 ZC5T4 组,组名中“ZC5”表示“Z 形 C50 整浇试件”、“N”和“T”分别表示抗剪钢筋为“ $f_y=400$ MPa 的普通钢筋”和“ $f_y=600$ MPa 的高强钢筋”、“2”和“4”分别表示 h 为“20 mm”和“40 mm”。每组 3 个试件,共 12 个试件。

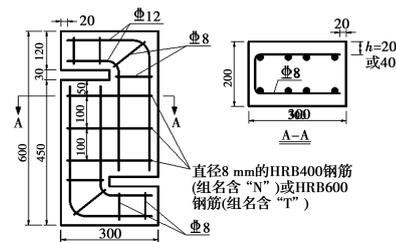


图 1 试件几何尺寸及钢筋配置(单位:mm)

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

试件一次浇筑成型,混凝土采用表 1 中的配合比,设计强度等级为 C50。其中,水泥采用 P. O 42.5R 级早强型普通硅酸盐水泥;粗骨料采用石灰岩碎石,粒径为 10~12 mm;外加剂采用聚羧酸系高效减水剂。试件加载时测得混凝土立方体抗压强度为 55.6 MPa。试件抗剪钢筋采用直径为 8 mm 的 HRB400 级和 HRB600 级钢筋,试验测得两者的屈服强度分别为 450、645 MPa。

表 1 C50 混凝土配合比

Table 1 Mix proportion of C50 concrete

							kg/m ³
水	水泥	砂	石	外加剂	S95 级矿粉	粉煤灰	
165	363	700	1 050	3.13	23.5	23.5	

1.2 加载及测量方案

加载试验在量程为 1 000 kN 的电液伺服万能试验机上进行,通过试件两端尺寸为 200 mm×150 mm×15 mm 的钢板进行单调加载。试验时先以 0.3 kN/s 速率加载至 10 kN 进行预加载,然后卸荷至 1 kN,再以 0.3 kN/s 速率进行加载,直至试件破坏为止。加载过程中,通过 LVDT 来实时测量界面两侧的竖向相对滑移和横向裂缝张开宽度,如图 2 所示。

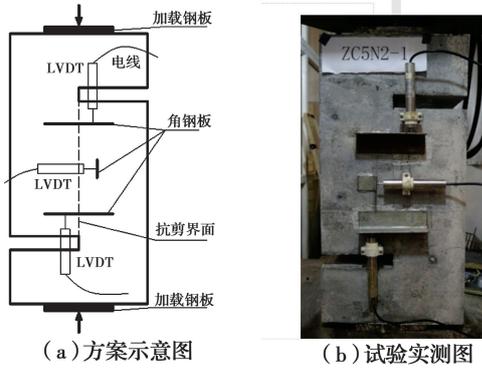


图 2 试件加载及 LVDT 布置图

Fig. 2 Specimen loading and LVDT arrangement

2 试验结果与分析

2.1 试验现象

根据测试过程中记录的视频,加载过程中观察到的第一个试验现象是界面附近出现微小的肉眼可见裂缝,该裂缝与界面大致呈 0°~10° 的夹角,如图 3 所示。随后观察到界面相对滑移逐渐开展,裂缝宽度不断增大,最后破坏面附近混凝土局部剥落或者抗剪钢筋的混凝土保护层整体剥落,试件丧失承载能力。

2.2 破坏形态

试验结束时,所有试件均出现与界面呈 0°~10° 的主斜裂缝(ZC5N2-2 试件加载时出现端部压碎的异常现象,不再讨论),同时,抗剪钢筋均未被完全剪断,破坏后的全部试件如图 4 所示。整体而言,试件出现两种破坏模式:1)保护层厚度为 20 mm 的试件

破坏时,主斜裂缝附近混凝土局部剥落,裸露出破坏面周围部分抗剪钢筋,同时,试件侧面没有出现竖向裂缝或裂缝宽度较小,如图 5 所示;2)保护层厚度为 40 mm 的试件破坏时,试件侧面有明显的竖向裂缝,抗剪钢筋混凝土保护层已经或接近整体剥落,如图 6 所示。



图 3 试件初始裂缝图

Fig. 3 Initial cracks of specimen



图 4 破坏后的试件

Fig. 4 Specimens after damage



图 5 ZC5N2-1 破坏形态

Fig. 5 Failure pattern of ZC5N2-1

产生这两种破坏模式的原因在于,主拉斜裂缝出现后,抗剪钢筋开始承受较大的剪力,同时给钢筋周围的混凝土施加劈裂力,当这种劈裂力大于混凝土的抗拉强度时,混凝土被拉坏。当混凝土保护层厚度为 20 mm 时,界面附近的混凝土保护层被局部挤落;当混凝土保护层厚度增大到 40 mm 时,混凝土保护层有被整体劈裂而剥落的趋势。



图 6 ZC5T4-3 破坏形态

Fig. 6 Failure pattern of ZC5T4-3

2.3 主要试验结果与影响参数分析

根据试验全过程采集的数据,表 2 列出了整浇界面的直剪承载力 V_u 及其对应的界面相对滑移 S_u 。需要说明的是,试件 ZC5N2-2 加载时出现端部压碎的异常现象,因此,未给出其试验结果。为了方便分析,图 7 给出了各试件 V_u 和 S_u 的对比情况。

表 2 主要的试验结果
Table 2 Main test results

组号	组内编号	V_u /kN	S_u /mm
ZC5N2	1	488.8	0.372
	3	478.5	0.501
	均值	483.7	0.437
ZC5N4	1	514.3	0.617
	2	486.1	0.541
	3	501.1	0.266
均值	500.5	0.475	
ZC5T2	1	503.6	0.452
	2	495.5	0.385
	3	452.6	0.416
均值	483.9	0.418	
ZC5T4	1	474.3	0.264
	2	481.6	0.516
	3	510.6	0.361
均值	488.8	0.380	

2.3.1 抗剪钢筋屈服强度的影响 为了研究抗剪钢筋屈服强度 f_y 对整浇界面直剪性能的影响,将 ZC5N2 组与 ZC5T2 组、ZC5N4 组与 ZC5T4 组分别进行对比分析。由图 7(a)可知,ZC5N2 组与 ZC5T2 组各试件 V_u 值相差不大。由表 2 可知,两组试件 V_u 的均值分别为 483.7、483.9 kN,表明这两组试件的

V_u 均值仅变化了 0.04%。此外,由图 7(b)可知,这两组试件的 S_u 值差距并不明显。据表 2 可知,两组试件 S_u 均值分别为 0.437、0.418 mm,仅变化了 4.3%。

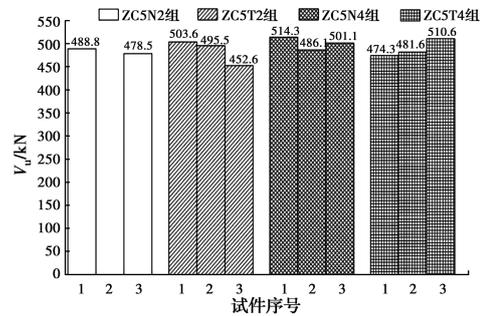
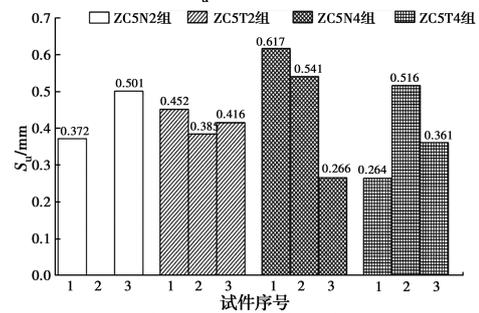
(a) V_u 测试值对比图(b) S_u 测试值对比图

图 7 主要的试验结果对比图

Fig. 7 Comparison of main test results

同理可知,ZC5N4 组与 ZC5T4 组的 V_u 值与 S_u 值也都变化不大。由此认为,当 f_y 由 400 MPa 提升至 600 MPa 时,整浇界面的 V_u 及 S_u 并无明显变化。因此,界面的抗剪刚度亦无明显变化。产生这种现象的原因可能在于,界面达到承载力峰值时 HRB600 级抗剪钢筋并未屈服。

2.3.2 混凝土保护层厚度的影响 为了研究抗剪钢筋混凝土保护层厚度 h 对整浇界面直剪性能的影响,将 ZC5N2 组与 ZC5N4 组、ZC5T2 组与 ZC5T4 组分别进行对比分析。由图 7(a)可知,ZC5N2 组与 ZC5N4 组各试件的 V_u 值相差不大。由表 2 可知,两组试件 V_u 的均值分别为 483.7、500.5 kN,表明两组试件的 V_u 均值仅变化了 3.5%。此外,由图 7(b)可知,这两组试件的 S_u 值差距并不明显。由表 2 可知,两组试件 S_u 均值分别为 0.437、0.475 mm,数值仅增加了 0.038 mm,增幅为 8.7%。

同理可知,ZC5T2 组与 ZC5T4 组的 V_u 值与 S_u 值也都变化不大。由此认为,当 h 由 20 mm 提高至 40 mm 时,整浇界面的 V_u 及 S_u 并无明显变化。因此,此时界面的抗剪刚度亦无明显变化。

2.4 界面荷载-滑移曲线及剪力传递机理分析

根据万能试验机所记录的荷载值以及 LVDT 测量的界面相对滑移值,绘制了整浇界面的荷载-滑移曲线,见图 8。需要说明的是,考虑到相似性以及易于对比,每组试件中仅选择了一根曲线绘制在图 8 中。

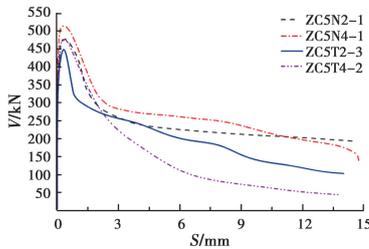


图 8 界面实测的荷载-滑移曲线

Fig. 8 Measured load-slip curves of interface

基于对图 8 实测曲线的分析,结合试验过程中观察到的现象,提出的整浇界面典型的荷载-滑移曲线如图 9 所示,据此可将整浇界面的直剪过程分为 4 个阶段。

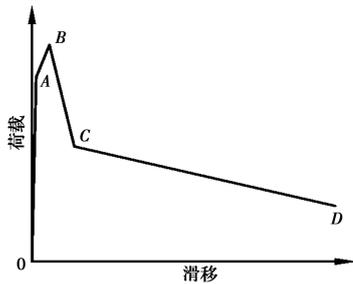


图 9 界面典型的荷载-滑移曲线

Fig. 9 Typical load-slip curve of interface

阶段 1(弹性阶段,如图 9 线段 OA 所示):荷载值从 0 增加至约 $0.7V_u \sim 0.8V_u$ 时,界面的相对滑移非常小,此阶段荷载与位移基本呈线弹性关系,界面直剪承载力主要由混凝土的粘结力和内聚力提供。

阶段 2(承载力峰值阶段,如图 9 线段 AB 所示):在此阶段,界面出现肉眼可见斜裂缝,滑移增长速率较前一阶段明显提高,但最大滑移值仍然很小,一般不超过 0.6 mm。滑移值的增加使得混凝土的粘结力和内聚力有所降低,并使抗剪钢筋更多地参与到界面抗剪,而鉴于此时界面相对滑移很小,混凝土的粘结力和内聚力对界面抗力的贡献仍然较大。在本阶段的最后,荷载达到界面直剪承载力峰值 V_u ,界面承载力主要由混凝土的粘结力、内聚力以及抗剪钢筋引起的摩擦力提供。

阶段 3(荷载释放阶段,如图 9 线段 BC 所示):一般情况下,荷载在 V_u 附近会持续 3 s 左右,随后界面进入荷载释放阶段(此时部分试件会听见“砰”的一声)。在该阶段,界面滑移较前两个阶段有明显的增大,这使得混凝土的粘结力和内聚力很快下降,并在该阶段的最后降至接近于 0,此时的界面承载力主要由抗剪钢筋引起的摩擦力和销栓作用提供。

阶段 4(破坏阶段,如图 9 线段 CD 所示):在该阶段,由于界面的滑移和裂缝宽度较大,混凝土的粘结力、内聚力以及界面摩擦力基本不再提供抗力,界面承载力主要由抗剪钢筋的销栓作用提供。当钢筋给周围混凝土施加的劈裂力大于混凝土的抗拉强度时,界面附近混凝土局部剥落或者抗剪钢筋的混凝土保护层整体剥落,界面丧失承载能力。

综上所述,在加载过程的不同阶段,界面的抗力由不同的因素提供,当界面达到直剪承载能力极限状态时,界面直剪承载力主要由混凝土的粘结力、内聚力以及抗剪钢筋引起的摩擦力提供。

3 相关规范的设计条款评估

3.1 相关规范的设计条款简介

选用 3 个应用比较广泛的规范进行评估,分别是美国的混凝土规范 ACI^[2]、混凝土设计手册 PCI^[3]以及桥梁规范 AASHTO^[4]。考虑到规范中直剪界面抗剪计算公式均是基于摩擦抗剪理论提出的关于 ρf_y 的线性表达式,它们相互之间并无本质区别^[1];此外,中国规范设计公式^[14](如:剪力墙水平施工缝的受剪承载力公式)的适用对象为新老混凝土界面,没有提供与整浇界面相对应的摩擦系数,而规范 ACI、PCI 和 AASHTO 中的界面抗剪设计公式适用于所有 3 类直剪界面。因此,对以上 3 个规范进行评估。

表 3 列出了 ACI^[2]、PCI^[3]以及 AASHTO^[4]中整浇界面直剪承载力计算公式及相应的限制条件。为方便对比,各公式参数均采用国际单位制,并将各参数符号进行了统一,表中 V_u 为界面直剪承载力, N; A_{vt} 为抗剪钢筋面积, mm^2 ; A_{cv} 为界面面积, mm^2 ; c 为界面黏聚力,仅存在于 AASHTO 中,其值为 2.76 MPa; f_y 为抗剪钢筋屈服强度, MPa; f'_c 为混凝土圆柱体轴心抗压强度, MPa; μ 为界面摩擦系数,取 1.4; μ_e 为界面有效摩擦系数; P_c 为外力引起的界面法向压力; K_1 为考虑混凝土强度的界面直剪承

承载力限制系数, ACI、AASHTO 和 PCI 中 K_1 取值分别为 0.20、0.25 和 0.30; K_2 为界面直剪承载力限

制参数, ACI、AASHTO 和 PCI 中 K_2 取值分别为 11.03、10.34、6.89 MPa。

表 3 各规范整浇界面直剪承载力计算公式

Table 3 Calculation formulas of shear capacity for monolithically cast interfaces in codes

规范名称	计算公式	限制条件
ACI	$V_u = A_{vf} f_y \mu$	$V_u \leq K_1 f_c' A_{cv}; V_u \leq K_2 A_{cv}$ $V_u \leq (3.31 + 0.08 f_c') A_c; f_y \leq 414 \text{ MPa}$
AASHTO	$V_u = c \cdot A_{cv} + \mu \cdot (A_{vf} f_y + P_c)$	$V_u \leq K_1 f_c' A_{cv}; V_u \leq K_2 A_{cv}; f_y \leq 414 \text{ MPa}$
PCI	式(a) $V_u = A_{vf} f_y \mu$	$V_u \leq K_1 f_c' A_{cv}; V_u \leq K_2 A_{cv}$
	式(b) $V_u = A_{vf} f_y \mu_e, \mu_e = \frac{6.9 A_{cv} \mu}{V_u}$	$f_y \leq 414 \text{ MPa}; \mu_e \leq 3.4$

对比各计算公式不难发现, ACI 与 PCI 仅考虑了摩擦力对直剪承载力的贡献; AASHTO 考虑了混凝土界面粘结力或内聚力、摩擦力以及外力引起的界面法向压力对直剪承载力的影响。

3.2 适用性与经济性评估

为了对各设计规范进行评估, 表 4 列出了各试件直剪承载力的测试值与计算值之比。表中 V_t 为直剪承载力测试值; V_{ACI} 、 V_{PCIa} 、 V_{PCIb} 和 V_{AAS} 分别为依据 ACI 计算式、PCI 计算式(a)、PCI 计算式(b)和 AASHTO 计算式得到的直剪承载力计算值。

表 4 各试件直剪承载力的测试值与计算值的比值

Table 4 Values of experimental-to-calculative shear capacity ratio of specimens

试件编号	ACI	PCI		AASHTO
	V_t/V_{ACI}	V_t/V_{PCIa}	V_t/V_{PCIb}	V_t/V_{AAS}
ZC5N2-1	2.80	2.80	1.82	1.44
ZC5N2-3	2.74	2.74	1.78	1.41
ZC5N4-1	2.94	2.94	1.91	1.51
ZC5N4-2	2.78	2.78	1.81	1.43
ZC5N4-3	2.87	2.87	1.86	1.47
ZC5T2-1	2.88	2.88	1.87	1.48
ZC5T2-2	2.84	2.84	1.84	1.46
ZC5T2-3	2.59	2.59	1.68	1.33
ZC5T4-1	2.71	2.71	1.76	1.39
ZC5T4-2	2.76	2.76	1.79	1.42
ZC5T4-3	2.92	2.92	1.90	1.50
均值	2.80	2.80	1.82	1.44
变异系数	3.7%	3.7%	3.7%	3.7%

由表 4 可知, V_t/V_{ACI} 、 V_t/V_{PCIa} 、 V_t/V_{PCIb} 和 V_t/V_{AAS} 的均值分别为 2.80、2.80、1.82 和 1.44, 变异系

数为 3.7%, 由此表明, 3 个规范均能较好地应用于指导工程设计, 但 ACI 和 PCI 显得过于保守, 而 AASHTO 的计算精度最高。由上述剪力传递机理分析结果可知, 混凝土粘结力和内聚力对峰值直剪承载力的贡献较大, 由于 AASHTO 考虑了混凝土的粘结力和内聚力的贡献, 使得其计算的精确度更高。

4 结论

1) 抗剪钢筋的屈服强度 f_y 由 400 MPa 提升至 600 MPa 时, 整浇界面的直剪强度及刚度均无显著变化。产生这种现象的原因可能在于, 界面达到承载力峰值时 HRB600 级抗剪钢筋并未屈服。

2) 抗剪钢筋的混凝土保护层厚度 h 由 20 mm 增加到 40 mm 时, 整浇界面的直剪强度及刚度均无显著变化, 但界面破坏模式由破坏面附近混凝土局部剥落变为混凝土保护层整体剥落。

3) 对于本文试件而言, 规范 AASHTO 设计公式的计算精度比 ACI 和 PCI 的高。界面剪力传递机理分析表明, 当界面达到直剪承载能力极限状态时, 混凝土的粘结力和内聚力对界面直剪承载力的贡献较大。而 3 个规范中, 仅 AASHTO 设计公式考虑了混凝土的粘结力和内聚力对界面直剪承载力的贡献, 这即是该规范计算精度最高的原因所在。

参考文献:

- [1] 刘杰, 陈娟娟. 新老混凝土界面抗剪强度研究现状综述[J]. 混凝土, 2015(1): 62-67.
LIU J, CHEN J J. State of the art review on shear strength of interface between new and old concrete [J].

- Concrete, 2015(1): 62-67. (in Chinese)
- [2] ACI Committee 318. Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19) and Commentary (ACI 318R-14) [S]. Detroit: American Concrete Institute, 2019.
- [3] Precast/Prestressed Concrete Institute. PCI design handbook: precast and prestressed concrete[M]. 7th edition. Precast/Prestressed Concrete Institute, 2010.
- [4] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). AASHTO LRFD bridge design specifications [S]. 5th edition. Washington, DC: AASHTO, 2010.
- [5] LIU J, FANG J X, CHEN J J, et al. Evaluation of design provisions for interface shear transfer between concretes cast at different times [J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(6): 06019002.
- [6] HARRIES K A, ZENO G, SHAHROOZ B. Toward an improved understanding of shear-friction behavior [J]. ACI Structural Journal, 2012, 109(6): 835-844.
- [7] BARBOSA A R, TREJO D, NIELSON D. Effect of high-strength reinforcement steel on shear friction behavior [J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(8): 04017038.
- [8] KAHN L F, MITCHELL A D. Shear friction tests with high-strength concrete [J]. ACI Structural Journal, 2002, 99(1): 98-103.
- [9] WU P T, WU C Q, LIU Z X, et al. Investigation of shear performance of UHPC by direct shear tests [J]. Engineering Structures, 2019, 183: 780-790.
- [10] SNEED L H, KRC K, WERMAGER S, et al. Interfaceshear transfer of lightweight-aggregate concretes with different lightweight aggregates [J]. PCI Journal, 2016, 61(2): 38-55.
- [11] XIAO J Z, SUN C, LANGE D A. Effect of joint interface conditions on shear transfer behavior of recycled aggregate concrete [J]. Construction and Building Materials, 2016, 105: 343-355.
- [12] 卢海霞, 林峰, 李彤煜. 高强钢筋和剪跨比对混凝土构件直剪性能的影响[J]. 结构工程师, 2013, 29(2): 146-152.
- LU H X, LIN F, LI T Y. Effects of the HRB500 steel rebar and shear span ratio on the direct shear performance of reinforced concrete members [J]. Structural Engineers, 2013, 29(2): 146-152. (in Chinese)
- [13] 混凝土结构耐久性设计规范: GB/T 50476—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- Code for durability design of concrete structures: GB/T 50476-2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese)
- [14] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- Code for design of concrete structures: GB 50010-2010 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2015. (in Chinese)

(编辑 章润红)