

双钢板混凝土组合结构起波钢筋连接件的拉伸力学性能研究

卫林强, 赵唯以*

(青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525)

摘要: 提出将起波钢筋作为双钢板混凝土组合结构的连接件, 并设计开展 12 个组合板单元体试件的拉伸试验, 研究了直径和起波角度对起波钢筋连接件拉伸力学性能的影响。研究表明: 连接件的破坏模式分为拉直后断裂和未拉直即断裂两种, 当起波钢筋连接件在拉直后发生破坏时, 变形能力和耗能能力得到大幅提高; 随着连接件直径和起波角度的增大, 破坏位移、拉断力和耗能能力也增大, 但起波角度对拉断力影响较小; 提出起波钢筋连接件强度的计算方法, 计算结果与试验结果吻合较好。结合试验结果, 对双钢板混凝土组合结构起波钢筋连接件的设计提出了合理化建议。

关键词: 双钢板混凝土组合结构; 起波钢筋; 拉伸性能; 破坏位移; 拉断力; 耗能能力

中图分类号: TU398⁺.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2024)01-0036-09

Tensile properties of kinked rebar connectors of double-skin steel-concrete composite structures

WEI Linqiang, ZHAO Weiyi*

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: Proposing to use the kinked rebar as the connector of the double-skin steel-concrete composite structures, this study designs 12 composite plate unit specimens and carries out the tensile tests. The effect of the diameter and angle of the kinked rebar connector on its mechanical tensile properties is investigated. The results show that the failure modes of the connectors can be divided into two types: fracture after straightening and fracture without straightening. When the kinked rebar connector fails after straightening, the deformation capacity and energy consumption capacity are greatly improved. The failure displacement, breaking force and energy consumption capacity increase with the increase of connector diameter and kinked angle, but the kinked angle has little effect on the breaking force. The calculation method of the strength of kinked rebar connectors is proposed in the study, and the calculated results are in good agreement with the test results. Based on the test results, some reasonable suggestions are put forward for the design of kinked rebar connectors of double-skin steel-concrete composite structures.

Key words: double-skin steel-concrete composite structure; kinked rebar; tensile properties; failure displacement; breaking force; energy consumption capacity

收稿日期: 2022-10-02

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(52008219)

作者简介: 卫林强(1997-), 男, 山西运城人。硕士, 研究方向为组合结构。E-mail: 719182330@qq.com。

* 通信作者: 赵唯以(1989-), 男, 吉林长春人。博士, 副教授, 主要从事组合结构方面的研究。E-mail: zhaoweiyi@qut.edu.cn。

双钢板混凝土组合结构(double-skin steel-concrete composite structure,简称 SC 结构)是由外部两侧钢板、内部素混凝土以及连接件组成的一种结构形式。该结构中,连接件可以协同混凝土和钢板之间的工作,典型的 SC 结构形式如图 1 所示。在受力状态下,内部混凝土受到外部两侧钢板的约束,强度和变形能力提高;同时在内部混凝土的支撑作用和对拉连接件的拉结作用下,钢板不易发生屈曲。因而这种结构形式充分发挥了两种材料的优点,具有很好的承载能力,近年来得到了广泛的工程应用^[1]。

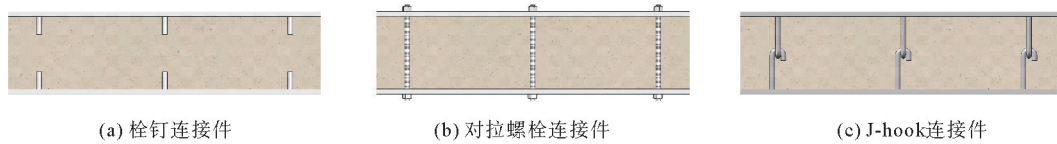


图 1 典型的 SC 结构形式

连接件对 SC 结构组合作用的发挥有着至关重要的影响。REMENNIKOV 等^[2]对未设置连接件的 SC 防护墙进行了落锤冲击试验,结果表明,外侧钢板与混凝土发生较大分离,承载能力较低,整个结构的耗能通过两端固定约束钢板的拉伸变形来实现。

为了减小钢板和混凝土的分离,SOHEL 等^[3]提出了设置成对拉结的 J-hook 连接件,并对该连接件形式的 SC 板进行落锤冲击试验。结果表明 J-hook 连接件能有效防止钢板和混凝土分离,承载能力得到有效提高。ZHAO 等^[1,4-10]对普通钢筋对拉连接件的 SC 板进行了落锤冲击试验,结果表明普通钢筋对拉连接件同样可以防止钢板和混凝土的分离,但在大变形下连接件最先失效,成为限制 SC 结构变形能力和耗能能力的瓶颈。

类似变形能力不足的问题在钢筋混凝土(RC)梁中已得到有效解决。FENG 等^[11-13]提出起波钢筋,并将其配置在 RC 梁中。通过试验发现 RC 梁在发生破坏时,起波处钢筋先拉直后拉断,极大地提高了 RC 梁的变形能力。樊源等^[14-15]对起波配筋 RC 梁在爆炸作用下的破坏过程进行了分析,发现设置起波钢筋能显著增加变形,耗能能力和抗爆性能大幅提升。

基于起波配筋 RC 梁的实践经验,本文提出一种采用起波钢筋连接件(kinked-rebar,简称 KR 连接件)的 SC 结构形式(简称 KR-SC 结构),解决大变形下现有各种连接件变形能力和耗能能力不足的问题。为探明 KR 连接件的受力性能,本文设计 12 个 KR-SC 板单元体试件,并展开拉伸试验,研究连接件直径和起波角度对破坏位移、拉断力、耗能能力的影响,为 KR-SC 结构的设计和应用提供理论依据。

1 试验概况

1.1 试件设计

本文共设计 12 个 KR-SC 板单元体试件。参考 AP1000 核电站 SC 模块化施工方法,KR-SC 板根据 1/5 缩尺 SC 模型进行制作,如图 2 所示。所有试件的尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm,其中混凝土厚

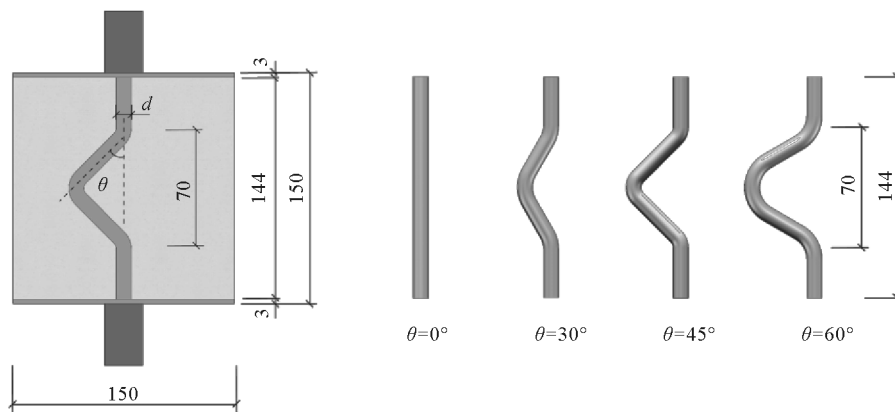


图 2 KR-SC 板单元体试件(单位:mm)

θ —起波角度; d —钢筋直径

度为 144 mm, 两侧钢板厚度为 3 mm。KR 连接件的起波长度 l 为 70 mm, 变化参数为起波角度 θ (0, 30, 45 和 60°, 其中 0° 试件为试验对照组) 和钢筋直径 d (6, 8, 10 mm)。表 1 列出了 12 个 KR-SC 板单元体试件的详细参数。

表 1 KR-SC 板单元体试件设计参数

试件编号	连接件直径/mm	起波角度/(°)	连接件原始长度/mm
S06-00	6	0	144
S06-30	6	30	154
S06-45	6	45	173
S06-60	6	60	214
S08-00	8	0	144
S08-30	8	30	154
S08-45	8	45	173
S08-60	8	60	214
S10-00	10	0	144
S10-30	10	30	154
S10-45	10	45	173
S10-60	10	60	214

1.2 材料性能

KR-SC 板单元体所用钢板为 Q235B 钢材, KR 连接件采用 HPB235 级钢筋。根据《金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法》(GB/T 228.1—2010)^[16], 对钢板和钢筋的材料性能进行测试, 结果见表 2 和表 3。

表 2 钢板材料性能

型号	实测平均厚度/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	断后伸长率/%
Q235B	3.0	346	500	34.25

表 3 钢筋材料性能

型号	直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	断面收缩率/%
HPB235	6	439	588	66
	8	432	490	69
	10	362	492	69

KR-SC 板单元体所用混凝土为自密实混凝土, 最大骨料粒径为 10 mm。制作单元体试件的同时, 预留标准立方体试块并同条件养护 28 d。测得混凝土立方体抗压强度的平均值为 57.7 MPa, 弹性模量的平均值为 3.05×10^4 MPa。

1.3 试验加载及数据采集

采用 WAW-600A 型万能试验机对 KR-SC 板单元体试件进行拉伸试验。试验机可以采用力控制和位移控制两种方法加载, 为获得 KR-SC 板单元体试件的受力全过程曲线, 本试验采用位移加载的方式。加载速率为 5 mm/min, 位移加载量程为 600 mm, 控制精度为 0.01 mm。试验中, 通过计算机采集位移和拉力数据。

2 试验结果

2.1 试验破坏现象

为了观察 KR-SC 板单元体试件内部连接件的破坏情况,在试验结束后去除混凝土进行观察,连接件最终的破坏结果如图 3 所示。



图 3 KR-SC 板单元体试件破坏

由图 3(a)(e)和(i)可知,直钢筋连接件的破坏现象与未包裹混凝土直钢筋的现象类似。但由于加工原因,S08-00 出现钢板焊点脱落现象,提前发生破坏。对比 KR 连接件的破坏形态(起波角度为 30,45 和

60°),有5个试件的KR连接件在破坏前起波处未被拉直,其余4个试件的KR连接件在拉直后发生破坏;除试件S10-60出现钢板焊点脱落,其他试件最终破坏位置处均出现颈缩现象。因此在试件焊接加工可靠的前提下,可以将其破坏方式分为未拉直破坏和拉直破坏两大类。

KR连接件经过3次连续弯折形成,在机械加工和拉直过程中起波处会产生损伤。因此对于拉直破坏的KR连接件,最终破坏位置一般集中在起波处;而未被拉直就出现破坏的KR连接件由于起波处变形很小,破坏位置位于KR连接件的平直部分。

2.2 典型破坏模式受力过程分析

针对KR连接件未拉直破坏和拉直破坏的两种情况,分别以试件S08-30和S08-45为例说明破坏过程。

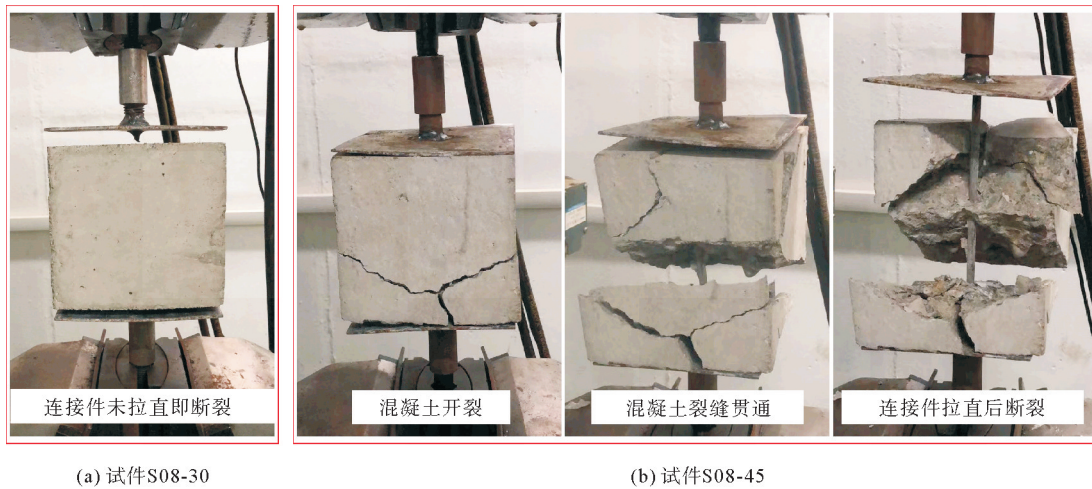


图4 典型试件拉伸过程

由图4(a)可知,试件S08-30在拉伸过程中,混凝土外观完整,未产生裂缝;KR连接件未被拉直即发生断裂。结合图5所示的试验力-位移曲线,可以发现最大拉力(22.2 kN)与同等直径的直钢筋断裂力相等。

图5显示,试件S08-45的试验力出现了3个峰值,各峰值对应的破坏特征如图4(b)所示。在第I段,随着位移的逐渐增大,试件两侧钢板与混凝土开始发生分离,连接件在拉伸变形过程中引起混凝土开裂。混凝土开裂后,试验力迅速降低,形成第1个峰值;在第II段,随着位移的继续增大,试验力再次上升,连接件逐渐被拉直。当混凝土裂缝完全贯通时,试验力再次迅速下降,形成第2个峰值;在第III段,混凝土退出工作,连接件被完全拉直,随后断裂,试验力下降至零,形成第3个峰值,其大小(20.6 kN)与同等直径的直钢筋断裂力基本一致。

同时,图5显示试件S08-45在破坏时的位移为66.3 mm,相比试件S08-30(破坏时位移17.4 mm)显著提高。因此,当连接件在拉直后发生破坏时,可以大幅增加试件的变形能力和耗能能力。

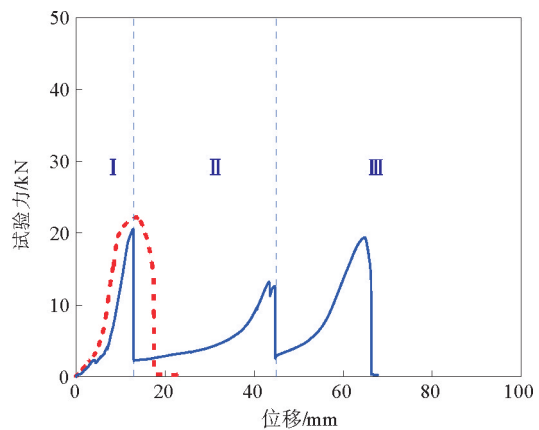


图5 典型试件试验力-位移曲线

--- S08-30; — S08-45

3 参数分析

3.1 连接件直径的影响

KR-SC 板单元体试件所用连接件的直径包含 6,8 和 10 mm 3 种。为研究连接件直径对试件拉伸性能的影响,将起波角度相同试件的试验力-位移曲线进行对比,如图 6 所示。

由图 6(a)可知,采用直钢筋连接件时,试件最终破坏试验力随着钢筋直径的增大而增大。由于试件 S08-00 在发生拉伸过程中钢板处焊点先于钢筋拉断破坏,钢筋未充分发挥其拉伸性能,最终试件 S08-00 的破坏位移较小,耗能也较小。

由图 6(b)(c)和(d)可知,采用 KR 连接件时,试件最终破坏试验力和破坏位移随着钢筋直径的增大而增大。当 $\theta=30^\circ$ 时,所有直径的 KR 连接件均未引起混凝土开裂。当 $\theta=45$ 和 60° 时,6 mm KR 连接件均未能引起混凝土开裂,而 8 和 10 mm KR 连接件使得混凝土开裂,最终发生拉直伸长破坏。值得注意的是,KR 连接件最终破坏模式相同的试件其试验力-位移曲线变化趋势相似。

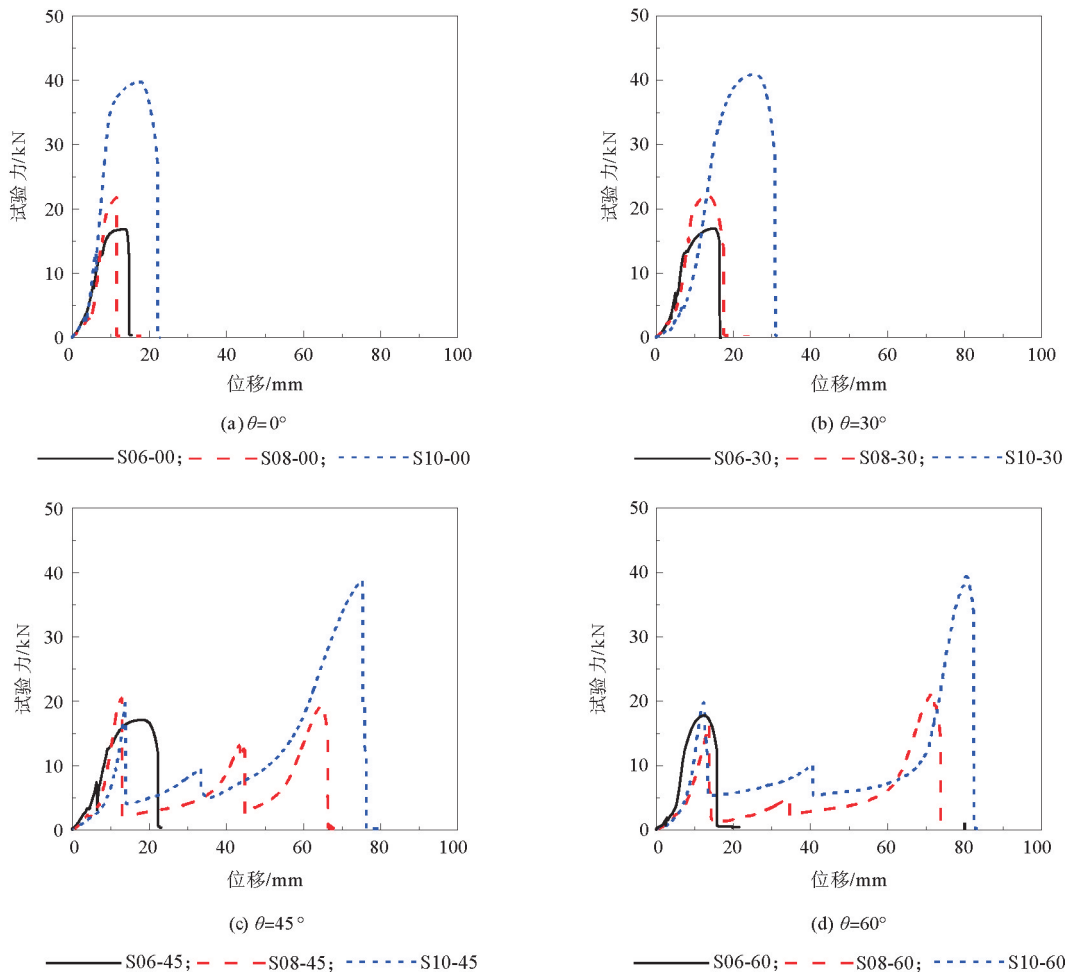


图 6 连接件直径对试验力-位移曲线的影响

不同直径 KR 连接件的最终位移、最终试验力和耗能能力存在较大差异。图 7 给出了直径对破坏位移、拉断力以及耗能的影响,其中耗能通过试验力-位移曲线积分获得,图 7 中以方框表示试件在拉直后断裂,以圆圈表示试件未拉直即断裂。由图 7 可知,连接件在拉直后发生破坏时,试件的破坏位移和耗能能力得到大幅提高。在相同起波角度下,KR 连接件的直径越大,其对应的破坏位移、拉断力和耗能能力也越大。

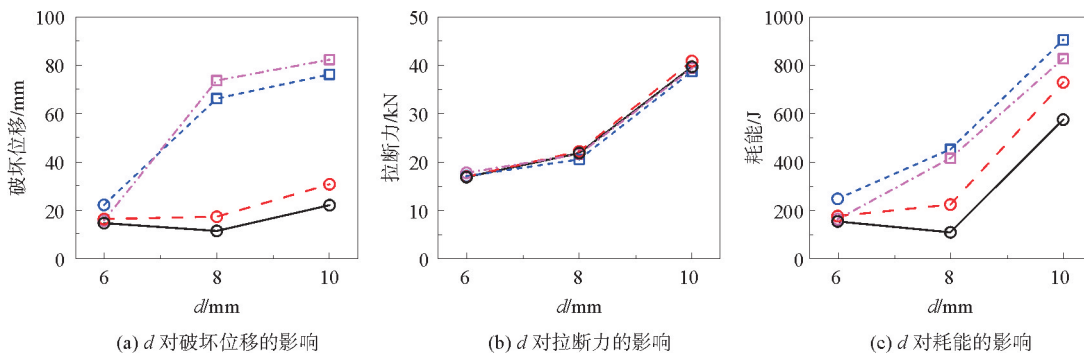


图7 不同直径对KR连接件的影响

— 0° ; - - 30° ; ··· 45° ; - · 60°

3.2 起波角度的影响

KR-SC板单元体试件连接件的起波角度选取 $0, 30, 45$ 和 60° 4种。为了研究连接件起波角度对试件拉伸性能的影响,将相同直径试件的试验力-位移曲线进行对比,如图8所示。

如图8(a)所示,6 mm试件均未出现混凝土开裂现象,在拉力达到直钢筋断裂力时发生破坏,破坏位移相对较小。由图8(b)(c)可知,KR连接件在发生破坏时,试件的拉断力基本相等,但采用KR连接件的试件的破坏位移却得到大幅提高。

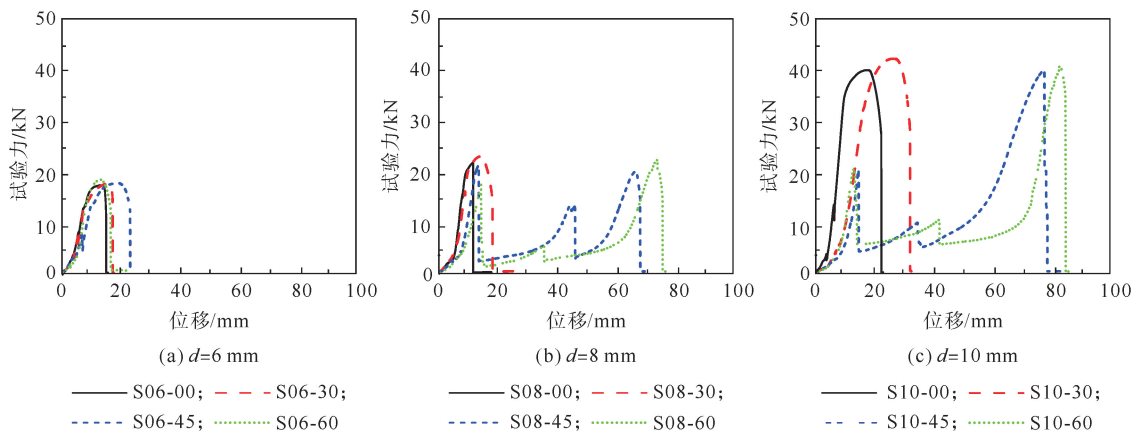


图8 起波角度对试验力-位移曲线的影响

不同起波角度KR连接件的最终位移和耗能能力存在较大差异。图9给出了起波角度对破坏位移、拉断力以及耗能的影响,同理,图9中以方框表示试件在拉直后断裂,以圆圈表示试件未拉直即断裂。由图9(a)可知,当KR连接件直径为8和10 mm时,随着起波角度的增大,试件的破坏位移也在不断增大,并且KR连接件在拉直后发生破坏时,破坏位移得到大幅提高,相应的耗能能力也在大幅提高,如图9(c)所示。其中 60° 试件的破坏位移最大, 45° 试件的耗能能力最好。而从图9(b)可知,起波角度对试件的拉断力基本无影响。

4 KR-SC板设计建议

4.1 KR连接件强度计算

针对本次试验中出现的2种破坏模式,对比KR-SC板单元体试件理论拉断力与试验结果。

由第3节的参数分析可知,无论最终KR连接件破坏模式如何,拉断力和直钢筋拉断力基本相同。因此,认为拉断力与所采用KR连接件钢筋的强度有关。

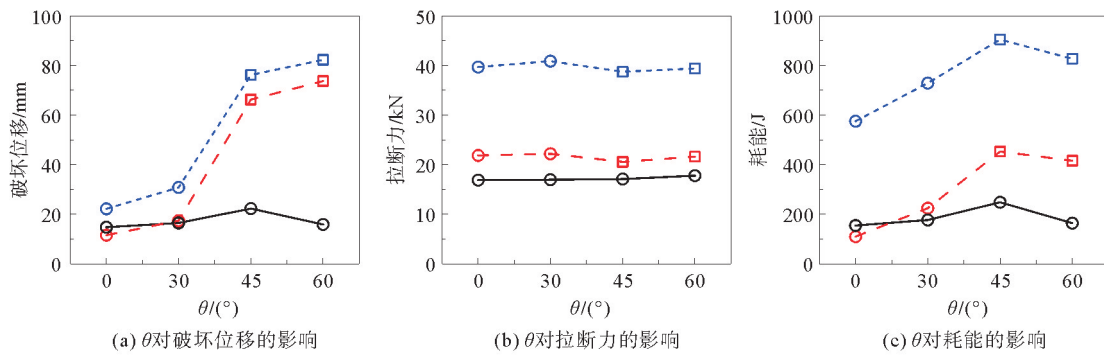


图 9 不同起波角度对 KR 连接件的影响

—— 6 mm; - - - 8 mm; ····· 10 mm

$$F = \pi d^2 f_u / 4 \tag{1}$$

式中: F 为试验机拉力值, N; f_u 为 KR 连接件直钢筋抗拉强度, MPa; d 为 KR 连接件直径, mm。

在本次试验中,部分试件(S08-00, S10-60)在连接焊点处发生破坏,连接件未能发挥作用。因此,在计算时也应考虑焊缝处的强度。

$$F = 0.7 h_f \pi d f_u \tag{2}$$

式中: h_f 为焊脚尺寸, mm。

焊脚尺寸按照《钢筋焊接及验收规程》(JGJ 18—2012)中 4.5.11 条规定和《钢结构焊接规范》(GB 50661—2011)中 5.4 条规定进行取值。

在 KR-SC 板中, SC 结构整体性能的发挥依靠连接件的连结作用。因此,还应考虑钢板的剪切破坏。

$$F = \pi(d + h_f) t_p f_{pu} / \sqrt{3} \tag{3}$$

式中: t_p 为钢板厚度, mm; f_{pu} 为钢板的抗剪强度, MPa。

综上, KR-SC 板单元体试件的最终破坏应取式(1)—(3)中的最小值, 即:

$$F_{\text{Damage}} = \min\{\pi d^2 f_u / 4, 0.7 h_f \pi d f_u, \pi(d + h_f) t_p f_{pu} / \sqrt{3}\} \tag{4}$$

式中: F_{Damage} 为 KR 连接件最大拉断力, N。

根据式(1)—(4), 将试件计算的理论强度与试验结果进行对比, 由表 4 可知, 计算结果与试验结果吻合较好。

表 4 理论计算强度与试验结果对比

试件编号	$\pi d^2 f_u / 4 / \text{kN}$	$0.7 h_f \pi d f_u / \text{kN}$	$\pi(d + h_f) t_p f_{pu} / \sqrt{3} / \text{kN}$	$F_{\text{Damage}} / \text{kN}$	试验力/kN	破坏模式	试验/理论
S06-00					16.9	未被拉直即断裂	1.02
S06-30	16.6	23.3	24.5	16.6	16.9	未被拉直即断裂	1.02
S06-45					17.1	未被拉直即断裂	1.03
S06-60					17.8	未被拉直即断裂	1.07
S08-00					21.8	钢板焊点脱落	0.89
S08-30	24.6	34.5	32.7	24.6	22.3	未被拉直即断裂	0.91
S08-45					20.6	拉直后断裂	0.84
S08-60					21.7	拉直后断裂	0.88
S10-00					39.7	未被拉直即断裂	1.03
S10-30	38.6	54.1	40.8	38.6	40.9	未被拉直即断裂	1.06
S10-45					38.7	拉直后断裂	1.00
S10-60					39.4	钢板焊点脱落	1.02

4.2 KR-SC板设计建议

1) KR连接件在拉直后发生破坏时,试件的破坏位移和耗能能力得到大幅提高。从耗能情况来看,起波角度为 45° 的试件耗能能力最好。因此,KR连接件起波角度推荐选用 45° 。

2) KR连接件在直径选用6 mm时,连接件未拉直即发生破坏;同样在起波角度选用 30° 时,连接件也未被拉直即发生破坏。因此,只有当KR连接件、混凝土和钢板的几何尺寸和材料强度处于合适范围时,才能充分发挥作用。

3) 为了保证KR连接件发生拉直后断裂,可以在KR连接件起波处设置拉直保护装置(FRP护套或泡沫填充物),使得KR连接件在大变形作用下,充分发挥先拉直后拉长的变形特性。

5 结论

本文通过对12个KR-SC板单元体试件进行拉伸试验,综合分析KR连接件直径、起波角度的影响,主要得到以下结论:

1) 连接件的破坏模式分为拉直后断裂和未拉直即断裂两种,当起波钢筋连接件在拉直后发生破坏时,变形能力和耗能能力得到大幅提高。

2) 随着连接件直径和起波角度的增大,破坏位移、拉断力和耗能能力也增大,但起波角度对拉断力影响较小。

3) 针对试验出现的两种破坏模式,提出KR连接件强度的计算方法,计算结果与试验结果吻合较好。

4) 从耗能情况来看,KR连接件的起波角度应优先选择 45° 。

5) 为保证KR连接件的变形能力充分发挥,建议在KR连接件起波处加设保护装置。

参考文献(References):

- [1] 赵唯以,王琳,郭全全,等.双钢板混凝土组合结构抗冲击性能的研究进展[J].钢结构(中英文),2020,35(3):26-36.
ZHAO Weiyi,WANG Lin,GUO Quanquan, et al. Research advances of impact resistance of steel-concrete composite structures[J]. Steel Construction(Chinese & English),2020,35(3):26-36.
- [2] REMENNIKOV A M,KONG S Y,UY B. The response of axially restrained non-composite steel-concrete-steel sandwich panels due to large impact loading[J]. Engineering Structures,2013,49:806-818.
- [3] SOHEL K M A,LIEW J Y R. Behavior of steel-concrete-steel sandwich slabs subject to impact load[J]. Journal of Constructional Steel Research,2014,100:163-175.
- [4] GUO Q Q,ZHAO W Y. Displacement response analysis of steel-concrete composite panels subjected to impact loadings[J]. International Journal of Impact Engineering,2019,131:272-281.
- [5] GUO Q Q,ZHAO W Y. Design of steel-concrete composite walls subjected to low-velocity impact[J]. Journal of Constructional Steel Research,2019,154:190-196.
- [6] ZHAO W Y,GUO Q Q. Experimental study on impact and post-impact behavior of steel-concrete composite panels[J]. Thin-Walled Structures,2018,130:405-413.
- [7] ZHAO W Y,GUO Q Q,DOU X Q, et al. Impact response of steel-concrete composite panels:Experiments and FE analyses[J]. Steel Composite Structures,2018,26(3):255-263.
- [8] 赵唯以,郭全全.低速冲击下双钢板混凝土组合墙的力学性能研究[J].土木工程学报,2018,51(11):88-94.
ZHAO Weiyi,GUO Quanquan. Study on behavior of double-skin steel-concrete composite walls subjected to low-velocity impact[J]. China Civil Engineering Journal,2018,51(11):88-94.
- [9] 窦旭强,赵唯以,可飞,等.双钢板-混凝土组合剪力墙落锤冲击性能研究[J].建筑结构学报,2017,38(S1):84-89.
DOU Xuqiang,ZHAO Weiyi,KE Fei, et al. Drop hammer impact behavior of double steel-concrete composite shear walls[J]. Journal of Building Structures,2017,38(S1):84-89.
- [10] 赵唯以,高泽鹏,王琳,等.集中荷载作用下四边简支双钢板混凝土组合板的力学性能研究[J].工程力学,2022,39(3):158-170.
ZHAO Weiyi,GAO Zepeng,WANG Lin, et al. Mechanical performance of two-way simply supported steel-plate composite slabs under concentrated load[J]. Engineering Mechanics,2022,39(3):158-170.
- [11] FENG P,QIANG H,QIN W, et al. A novel kinked rebar configuration for simultaneously improving the seismic performance and progressive collapse resistance of RC frame structures[J]. Engineering Structures,2017,147:752-767.