

# T-CR 连接件抗剪承载力有限元分析

李帼昌,石先硕,许伟,杨志坚

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 提出一种新型 T-CR 抗剪连接件,分析其受力性能,以得到其抗剪机理.方法 合理选择构件的本构模型,采用 ABAQUS 建立有限元模型,研究不同参数对抗剪承载力的影响,T-CR 连接件的应力以及贯穿钢筋的应变随荷载的变化规律.结果 T-CR 抗剪连接件的荷载-滑移曲线大致可分成弹性阶段、弹塑性阶段及破坏阶段;T-CR 连接件自由边的应力比焊接边小,添加翼缘和配置贯穿钢筋对连接件的应力有一定影响;T-CR 连接件的贯穿钢筋下侧的拉应变随钢筋直径增加而减小,且连接件底部槽内的贯穿钢筋应变相比其上部槽内的贯穿钢筋的应变较大.结论 与 CR 连接件相比,T-CR 连接件抗剪承载力较高;提高混凝土强度等级、配置贯穿钢筋以及增加其直径可提高 T-CR 连接件的抗剪承载力.

**关键词** 抗剪承载力;抗剪机理;T-CR 连接件;有限元模型

中图分类号 TU398

文献标志码 A

## Finite Element Analysis of Shear-Capacity of T-CR Shear Connectors

LI Guochang, SHI Xianshuo, XU Wei, YANG Zhijian

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** This paper proposed a new T-CR shear connector, the shear resistance performance of T-CR connector was analyzed to its shear mechanism. the finite element model based on the platform of ABAQUS was established. Influence of different parameters on the bearing capacity, the variation rule of the stress curve of the T-CR connectors and the strain of transverse rebars were studied. The result shows that the load-slip curve of T-CR connectors can be approximately divided into the elastic stage, the plastic and elastic stage and the failure stage; The stress of the free edge of the T-CR connector is larger than that of the welded edge. Adding flange and configuring transverse rebars have a certain effect on the stress of connectors; The underside tensile strain of transverse rebars of T-CR connectors increasing decreases with the reinforcement diameter. The strain of transverse rebars in the bottom of the connector is larger than that of transverse rebars in the upper of the connector. The conclusion: Compared with the CR connector, the shear capacity of T-CR

收稿日期:2018-03-09

基金项目:国家十三五重点研究项目子课题(2017YFC070340702);国家自然科学基金项目(51578345);  
国家自然科学基金项目(51078242);辽宁省自然科学基金项目(2014020074)

作者简介:李帼昌(1964—),女,教授,博士,主要从事钢结构、组合结构等方面研究.

connector is higher. Increasing the strength of concrete, configuring transverse rebars and increasing its diameter can increase the shear capacity of T-CR connectors.

**Key words:** shear capacity; shear mechanism; T-CR connector; finite element model

在型钢-混凝土组合结构中,抗剪连接件是实现型钢与混凝土共同工作、发挥各自长处关键部位<sup>[1-2]</sup>.它能够传递型钢和混凝土界面上纵向剪力和抵抗型钢与混凝土交界面上的掀起力<sup>[3-4]</sup>.近年以来,各国学者提出了多种剪力连接件并将其应用于型钢混凝土结构中.其中应用最广泛的连接件是栓钉剪力连接件,各国学者对其研究已经比较成熟<sup>[5]</sup>.栓钉连接件属于柔性连接件,具有较好的变形能力<sup>[6-7]</sup>.Leonhardt等<sup>[8]</sup>提出的新型PBL连接件相比于其他传统剪力连接件具有承载力大、延性好、抗疲劳性能好等优点<sup>[9-10]</sup>,并且也被越来越多的应用到组合结构中.Verissimo<sup>[11]</sup>发明了另一种新型剪力连接件CR(Crestbond shear connector).CR连接件具有嵌入的切割形式,更容易定位贯穿钢筋的位置.这种新的剪力连接件由带有锯齿的钢肋组成切割形状,提供对纵向剪切的抗性并防止横向分离<sup>[12]</sup>.

但是CR连接件比相似尺寸开孔板连接件的抗剪承载力要低,而且对整体连接件的强度贡献较大的是贯穿钢筋和通过连接件槽内形成的混凝土榫<sup>[13]</sup>.针对已有的CR连接件抗剪承载力低的问题,笔者提出一种新型连接件(T-CR连接件),采用ABAQUS建

立T-CR连接件有限元模型,对其抗剪性能进行分析.研究表明,与CR连接件相比,T-CR连接件抗剪承载力较高,提高混凝土强度等级、配置贯穿钢筋以及增加其直径可提高T-CR连接件的抗剪承载力.

## 1 构件设计

笔者提出的新型T-CR连接件如图1所示.共设计13个构件,研究不同参数对T-CR连接件抗剪承载力的影响.型钢和连接件采用Q235钢材,构造钢筋和箍筋直径为10mm,贯穿钢筋采用HRB400,T-CR连接件的槽钉板厚12mm,槽钉高50mm,槽钉底宽100mm,槽钉顶宽50mm,槽钉间距150mm.构件形式如图2所示,构件编号和材料力学性能见表1,参考EC4推出试件如图3所示.

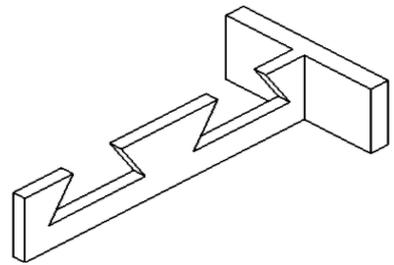


图1 T-CR 连接件

Fig.1 T-CR connector

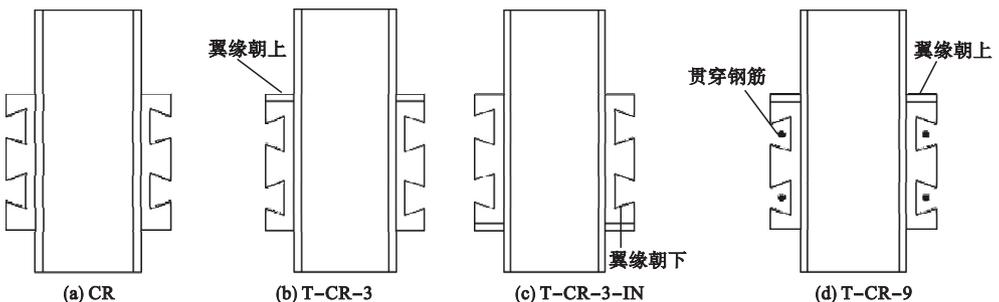


图2 典型连接件的形式

Fig.2 Typical connector geometries

表1 构件参数

Table 1 Parameters of specimens

编号	混凝土强度等级/MPa	贯穿钢筋直径/mm	T-CR的翼缘板			抗剪承载力/kN
			高/mm	宽/mm	厚/mm	
CR	C30	—	—	—	—	623
T-CR-1	C30	—	75	150	14	838
T-CR-2	C30	—	75	150	16	898
T-CR-3	C30	—	75	150	18	911
T-CR-3-IN	C30	—	75	150	18	906
T-CR-4	C30	—	75	150	20	919
T-CR-5	C30	—	75	140	16	900
T-CR-6	C30	—	75	160	16	931
T-CR-7	C40	—	75	140	16	1 005
T-CR-8	C50	—	75	140	16	1 127
T-CR-9	C30	16	75	140	16	991
T-CR-10	C30	20	75	140	16	998
T-CR-11	C30	25	75	140	16	1 010

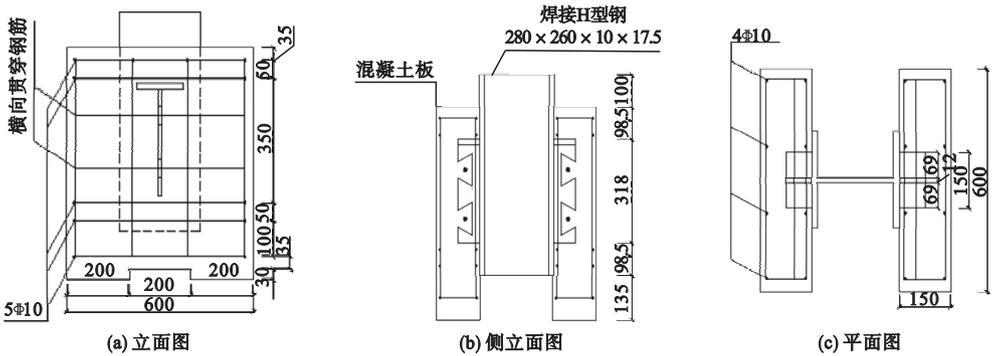


图3 推出试件

Fig. 3 Push-out test specimen

## 2 有限元模型的建立

### 2.1 材料本构关系模型

为了模型能较好地收敛,钢材采用双折线的弹塑性本构模型<sup>[14]</sup>:

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_s, \varepsilon_s \leq \varepsilon_y; \quad (1)$$

$$\sigma_s = f_y + k(\varepsilon_s - \varepsilon_y), \varepsilon_y < \varepsilon_s \leq \varepsilon_u. \quad (2)$$

混凝土本构模型采用 Hognestad 建议的混凝土单轴向应力-应变本构关系曲线:

$$\sigma = \sigma_0 \left[ 2 \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) - \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2 \right], \varepsilon \leq \varepsilon_0; \quad (3)$$

$$\sigma = \sigma_0 \left[ 1 - 0.15 \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_0} \right], \varepsilon_0 < \varepsilon \leq \varepsilon_{cu}. \quad (4)$$

Hognestad 建议:  $\varepsilon_{cu} = 0.0038$ , 其中  $\sigma_0$ 、 $\varepsilon_0$  为应力峰值对应的应变值,  $\sigma_0 = 0.85f'_c$ ,  $\varepsilon_0 = \frac{2\sigma_0}{E_0}$ , 其中  $f'_c$  为混凝土圆柱体抗压强度,  $E_0$  为混凝土初始弹性模量。

### 2.2 单元类型的选取与网格划分

在本模型中,混凝土、型钢、T-CR 以及贯穿钢筋采用实体单元 C3D8R, 钢筋网架采用桁架单元 T3D2。网格划分情况如图4所示。

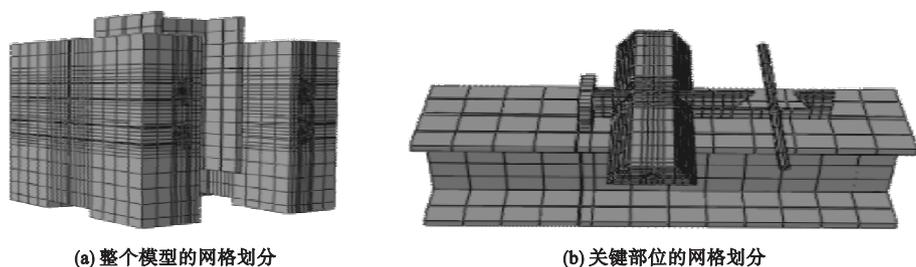


图4 模型网格的划分

Fig. 4 Meshing of model

### 2.3 接触关系

混凝土樁与混凝土板、贯穿钢筋与混凝土樁及剪力连接件与型钢采用绑定约束(tie);剪力连接件与混凝土之间的法向方向采用硬接触,切向方向采用摩擦约束,摩擦系数为0.3;钢筋网架与混凝土板采用 embedded region 约束<sup>[15]</sup>.

### 2.4 边界条件与加载方式

模型的混凝土底部设置全固定约束 ENCASTRE ( $U1 = U2 = U3 = UR1 = UR2 = UR3 = 0$ ),在工字型钢顶部采用位移加载.

## 3 模拟结果

### 3.1 连接件承载力和抗剪全过程分析

笔者提出的 T-CR 剪力连接件属于刚性连接,参考文献[16]中对柔性连接件和刚性连接件的滑移量要求,对于刚性连接件,取滑移量为6 mm 时对应的荷载为抗剪承载力. CR 连接件和 T-CR-3 连接件的荷载-滑移曲线如图5所示.

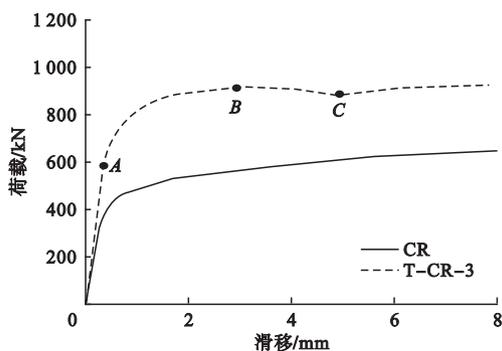


图5 连接件的荷载-滑移曲线对比

Fig. 5 Load-slip curves comparison of connectors

由图5可知,T-CR-3 和 CR 连接件对应的承载力分别为911 kN、623 kN. T-CR-3 连接件相比 CR 连接件的抗剪承载力提高了46%,因此,翼缘板对抗剪承载力影响较大.

T-CR-3 构件抗剪全过程曲线大致可分成3个阶段:

(1)弹性阶段(OA段):荷载随着滑移的增加呈线性增长,此时连接件处于弹性阶段,弹性滑移极限在  $0.3 \text{ mm} < u < 0.4 \text{ mm}$ ,此阶段型钢与混凝土板之间的相对滑移很小,T-CR 连接件的抗剪刚度较大.

(2)弹塑性阶段(AB段):当滑移在  $0.4 \text{ mm} < u < 2.8 \text{ mm}$  时,荷载-滑移曲线上切线的斜率不断变小,荷载增长缓慢.

(3)破坏阶段(BC段):当滑移  $2.8 \text{ mm} < u$  后,型钢与混凝土板的相对滑移增加较快,抗剪刚度不断退化.

### 3.2 构件主要部分应力、应变分析

以 T-CR-9 构件为例进行分析,T-CR-9 构件配置了4根直径为16 mm 的横向贯穿钢筋.构件应力、应变云图如图6所示.从图6可以看出,当达到抗剪承载力时(见图6(a)),混凝土板中部的压应变都超过混凝土的极限压应变值0.001 43,说明混凝土板中部会发生压碎破坏.从图6(b)可以看出,贯通钢筋均发生屈服,说明此时混凝土樁已退出工作,荷载由贯穿钢筋承担.从图6(c)可以看出,T-CR 连接件的应力分布基本一致,其中焊缝处的部分钢材发生屈服,而自由端基本处于弹性阶段.可见,T-CR 自由端的应力明显小于焊缝处的应力.

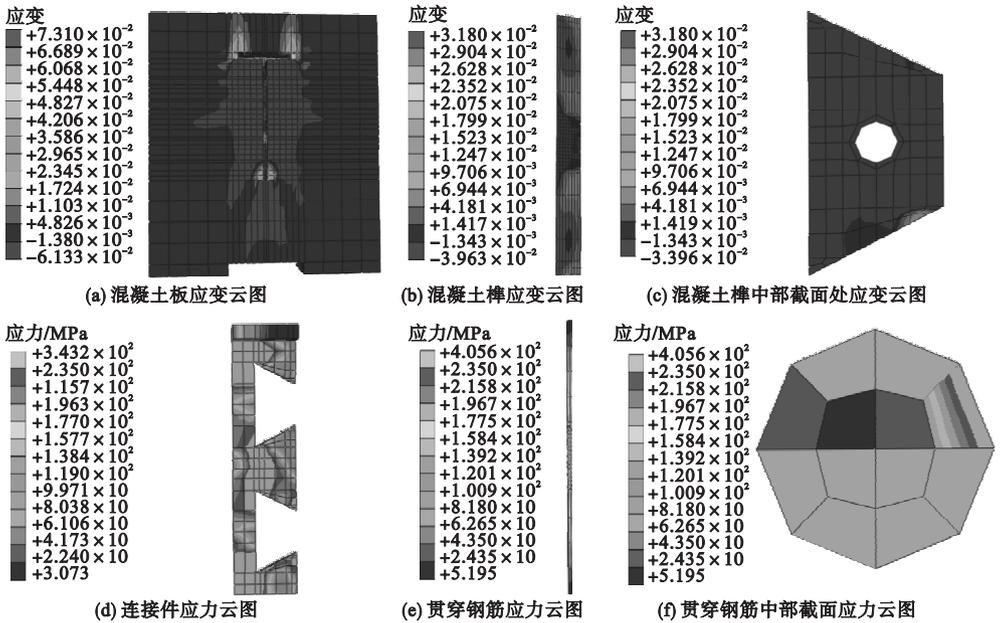


图6 主要部分的应变、应力云图

Fig. 6 The strain and stress contour plot of the main part

### 3.3 连接件应力分析

以 T - CR - 9 构件为例进行分析,应力分析位置见图 7(a). 各分布点的荷载 - 应力曲线见图 7(b)、(c)、(d). 由图可知,由于焊接边与型钢连接,受力较大,故随着荷载的增大,连接件腹板 B1 处的应力大于 B2 处应力. 在加载初期,由于混凝土榫和贯穿钢筋承担剪力,且 B3 处与混凝土榫紧密接触,故槽

钉周边 B4、B5 处的应力小于 B3 处的应力. 在加载后期,混凝土榫破碎和贯穿钢筋屈服,荷载主要由 T - CR 连接件承担,又因为 B4 处位于焊接边,受力较大,故 B4 的应力较大. 同样,对于腹板两侧的翼缘板,焊接边 B6、B8 处应力明显大于自由端 B7、B9 处应力,分析原因为焊接边与型钢连接,受力较大.

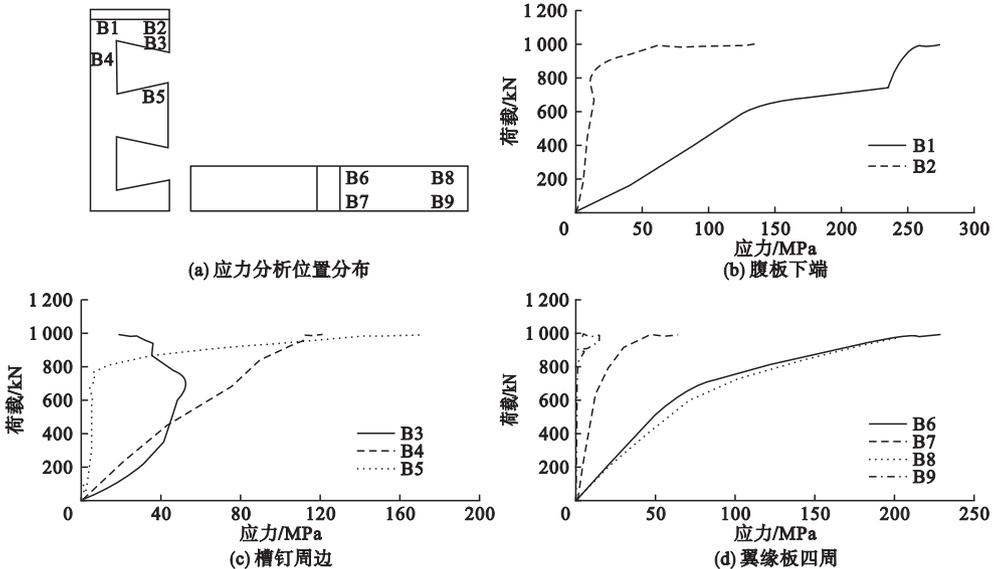


图7 连接件应力分析位置分布及应力曲线

Fig. 7 The stress analysis of position distribution and stress curves of connector

### 3.4 翼缘板对连接件应力影响

以 CR 和 T-CR-5 构件为例进行分析,研究翼缘板对连接件应力的影响.各分布点的荷载随应力变化曲线如图 8 所示.由图可知,在相同荷载作用下,CR 连接件 B1、

B2、B3、B4 处的应力大于 T-CR-5 连接件 B1、B2、B3、B4 处的应力,这是因为 T-CR-5 连接件主要由翼缘承担纵向剪力,减弱了混凝土榫的作用.

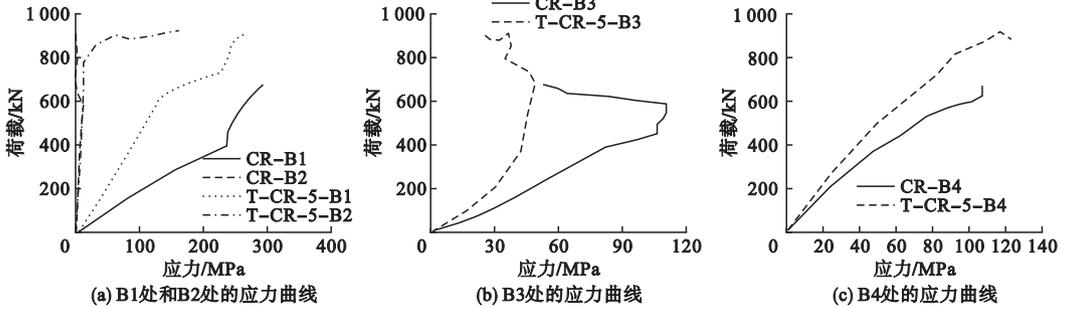


图 8 连接件的应力曲线

Fig. 8 The stress curves of connector

### 3.5 贯穿钢筋对连接件应力影响

以 T-CR-5 和 T-CR-9 构件为例进行分析,其中 T-CR-9 构件配置 4 根直径为 16 mm 的钢筋.各分布点荷载随应力变化的曲线如图 9 所示.加载前期,配置贯穿钢筋

对连接件各处的应力影响较小,分析原因为加载前期主要由翼缘板提供抗剪承载力,贯穿钢筋的作用较小;在达到抗剪承载力后,配置贯穿钢筋,对连接件各处的应力有一定影响,后期主要由贯穿钢筋提供抗剪承载力.

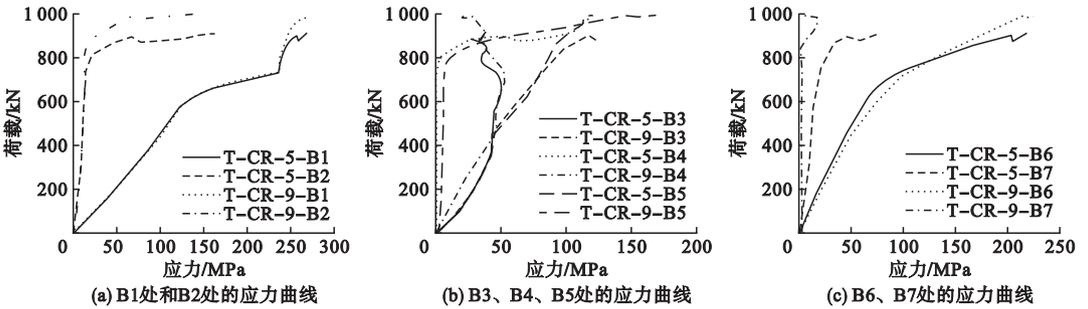


图 9 连接件的应力曲线

Fig. 9 The stress curves of connector

### 3.6 贯穿钢筋应变分析

在连接件槽钉内贯穿钢筋的应变分析位置如图 10(a) 所示.不同直径钢筋的荷载 -

贯穿钢筋的应变分布曲线如图 10(b)、(c) 所示.其中贯穿钢筋直径分别为 16 mm、20 mm、25 mm.

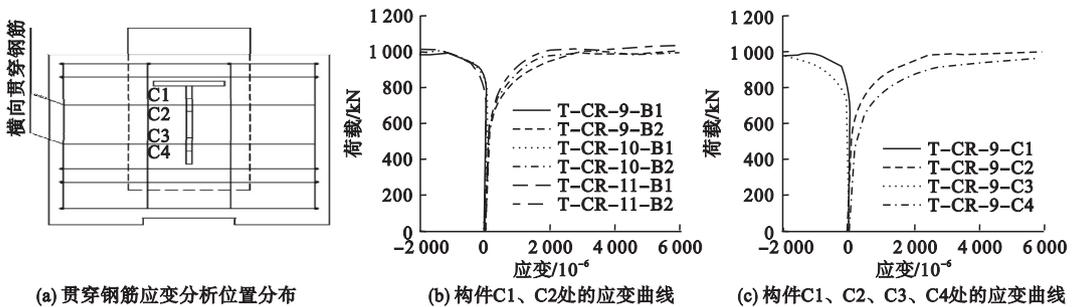


图 10 贯穿钢筋应变分析位置分布及荷载 - 横向贯穿钢筋应变曲线

Fig. 10 The Stress and strain analysis of position distribution and relation curves between load and strain of transverse rebars

从图 10(b)中可以看出,在相同荷载作用下,贯穿钢筋直径较小 T-CR-9 构件的贯穿钢筋下侧拉应变最大.在加载初期,各构件贯穿钢筋上、下侧应变均为受拉应变,说明贯穿钢筋受到拉弯的共同作用<sup>[17]</sup>.当荷载加至表 2 中相应荷载值时,各构件的贯穿钢筋上侧 C1 处拉应变已变为压应变(见表 2).从图 10(c)中可以看出,对于同一个连接件位于连接件底部槽内的贯穿钢筋的应变大于上部槽内贯穿钢筋的应变,这主要是因为滑移沿竖直方向的传递和累积使连接件下部槽内的贯穿钢筋所受荷载相对较大<sup>[18]</sup>.

表 2 贯穿钢筋应变

Table 2 The strain of rebars

构件编号	荷载/kN	钢筋应变/ $10^{-6}$	
		C1 处	C2 处
T-CR-9	833	-6.47	877
T-CR-10	748	-1.73	431
T-CR-11	661	-0.49	223

## 4 参数分析

### 4.1 连接件放置方向对抗剪承载力影响

翼缘板不同放置方向的荷载-滑移曲线如图 11 所示.

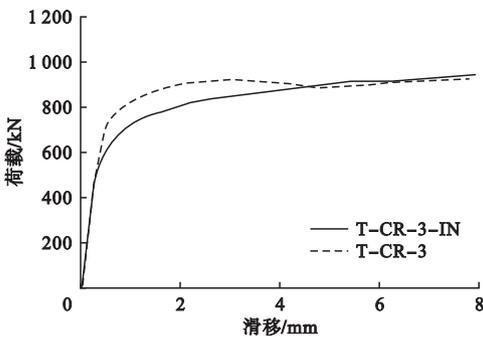


图 11 连接件的翼缘板两种不同放置方向的荷载-滑移曲线

Fig. 11 The load-slip curve of two different placement directions of the flange plate of the connector

由图可知,在加载前期( $0.4 \text{ mm} < u < 2.8 \text{ mm}$ ),T-CR 连接件的翼缘板朝上放置的抗剪承载力和抗剪刚度相比于朝下放置较大.分析原因,当翼缘板朝下放置时,抗剪承载力主要由翼缘板提供,而混凝土榫的作用较小;当翼缘板朝上放置时,抗剪承载力主要由翼缘板和混凝土榫共同提供,使得整个连接件性能得到更充分的发挥.

### 4.2 翼缘板厚度对抗剪承载力影响

不同翼缘厚度的荷载-滑移曲线如图 12 所示.

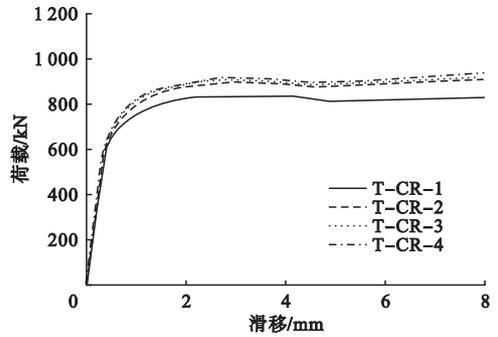


图 12 不同翼缘板厚度的荷载-滑移曲线

Fig. 12 Load-slip curves of different flange plate thicknesses

对比表 1 中的抗剪承载力可知,翼缘板厚度为 16 mm、18 mm、20 mm 的抗剪承载力相比翼缘板厚度为 14 mm 分别提高了 7%、9% 和 10%,翼缘板厚度为 18 mm、20 mm 的抗剪承载力相比翼缘板厚度为 16 mm 仅提高了 2%.因此,为了达到提高抗剪承载力又节约钢材的目的,建议翼缘板厚度取 16 mm.

### 4.3 翼缘板宽度对抗剪承载力影响

不同翼缘宽度的荷载-滑移曲线如图 13 所示.对比表 1 中的抗剪承载力可知,翼缘板宽度为 140 mm 和翼缘板宽度为 150 mm 的抗剪承载力基本相同,且相比于翼缘板宽度为 160 mm 的抗剪承载力仅降低了 3%.因此,建议翼缘板宽度取 140 mm.

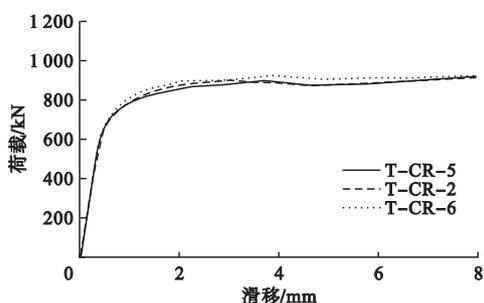


图 13 不同翼缘板宽度的荷载 - 滑移曲线

Fig. 13 Load-slip curves of different flange plate width

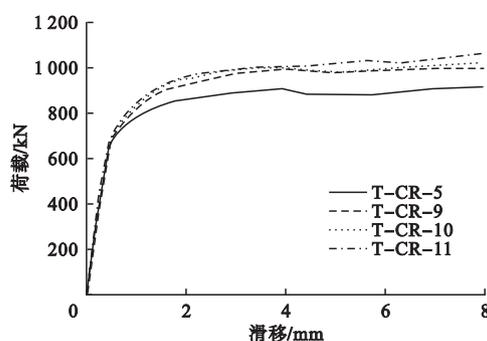


图 15 不同贯穿钢筋直径的荷载 - 滑移曲线

Fig. 15 Load-slip curves of the different reinforcing bar diameter

#### 4.4 混凝土强度对抗剪承载力影响

不同混凝土强度的荷载 - 滑移曲线如图 14 所示。

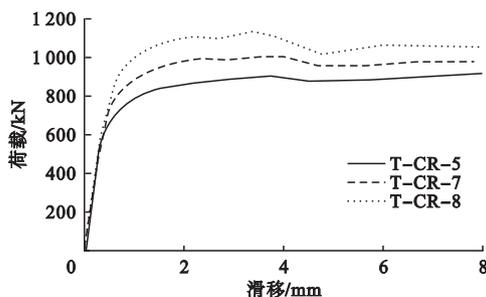


图 14 不同强度混凝土的荷载 - 滑移曲线

Fig. 14 Load-slip curves of concrete with different strength

对比表 1 中的抗剪承载力可知,相比于混凝土强度为 C30 时,混凝土强度为 C40、C50 的承载力分别提高了 12%、25%。随着翼板混凝土强度的增加,连接件的承载力也相应提高。这是因为 T-CR 抗剪连接件主要依靠翼缘钢板和混凝土榫来抵抗纵向剪力,提高混凝土强度一定会提高其抗剪承载力。

#### 4.5 贯穿钢筋直径对抗剪承载力影响

不同钢筋直径的荷载 - 滑移曲线如图 15 所示。对比表 1 中的抗剪承载力可知,适当提高贯穿钢筋直径能够增大其抗剪承载力。与无贯穿钢筋的试件相比,加入直径为 16 mm 的贯穿钢筋后抗剪承载力提高了 10%,继续提高贯穿钢筋直径承载力增长缓慢。且在一定范围内,提高钢筋面积会提高抗剪承载力。

## 5 结论

(1) T-CR 连接件自由边的应力比焊接边小,应力随荷载的增加而增大;T-CR 连接件的贯穿钢筋下侧拉应变随钢筋直径增加而减小,在相同荷载下,直径较小的钢筋首先达到屈服。在相同荷载作用下,CR 连接件各分析位置处的应力大于 T-CR 连接件各分析位置处的应力,加载后期配置贯穿钢筋对连接件的应力影响较大。

(2) T-CR 连接件比 CR 连接件的抗剪承载力提高了 46%,说明翼缘对抗剪承载力的影响较大。经对比分析,建议翼缘板厚度和宽度分别取为 16 mm 和 140 mm。T-CR 连接件的翼缘板朝上放置比朝下的放置抗剪承载力高。

(3) 混凝土的强度对 T-CR 连接件的抗剪承载力影响比较大,抗剪承载力随着混凝土强度的增加而增大。设置贯穿钢筋可以增加 T-CR 连接件的抗剪承载力,继续提高贯穿钢筋的直径,T-CR 连接件的抗剪承载力增长较为缓慢。

## 参考文献

- [1] 李嘉,杨波,邵旭东,等. 钢桥面 - 薄层 CRRPC 组合结构栓钉连接件抗剪疲劳性能研究[J]. 土木工程学报,2016,49(6):67-75.  
(LI Jia, YANG Bo, SHAO Xudong, et al. Research on shear fatigue of studs for composite

- deck system of steel slab and thin CRRPC layer [J]. China civil engineering journal, 2016, 49 (6): 67 - 75. )
- [ 2 ] LAM D, EL-LOBODY E. Behavior of headed stud shear connectors in composite beam [J]. Journal of structural engineering, 2014, 131 (1): 96 - 107.
- [ 3 ] 孙兴全. 设置开孔波折板连接件在组合柱连接性能试验研究[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2014.  
(SUN Xingquan. Experiment study on connection performance of corrugated perforated plate connectors in composite column [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2014. )
- [ 4 ] 胡家磊. 钢 - 混凝土组合结构中剪力连接件的发展评述[J]. 四川建材, 2017, 43(1): 62 - 63.  
(HU Jialei. The development of shear connectors in steel and concrete composite structure are reviewed [J]. Sichuan building materials, 2017, 43(1): 62 - 63. )
- [ 5 ] XU C, SUGIURA K, WU C, et al. Parametrical static analysis on group studs with typical push-out tests [J]. Journal of constructional steel research, 2012, 72: 84 - 96.
- [ 6 ] 丁发兴, 倪鸣, 龚永智, 等. 栓钉剪力连接件滑移性能试验研究及受剪承载力计算[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(9): 98 - 106.  
(DING Faxing, NI Ming, GONG Yongzhi, et al. Experimental study on slip behavior and calculation of shear bearing capacity for shear stud connectors [J]. Journal of building structures, 2014, 35(9): 98 - 106. )
- [ 7 ] DING F X, YIN G A, WANG H B, et al. Static behavior of stud connectors in bi-direction push-off tests [J]. Thin-walled structures, 2017, 120: 307 - 318.
- [ 8 ] LEONHARDT F, ANDRAE W, ANDRAE H P, et al. New improved bonding means for composite load bearing structure with high fatigue strength [J]. International journal of fatigue, 1987, 82(12): 325 - 331.
- [ 9 ] COSTA-NEVES L F, FIGUEIREDO J P, VELLASCO P C G S, et al. Perforated shear connectors on composite girders under monotonic loading: an experimental approach [J]. Engineering structures, 2013, 56(6): 721 - 737.
- [ 10 ] VIANNA J C, DEANDRADE S A L, VELLASCO P C G S, et al. Experimental study of perfo-bond shear connectors in composite construction [J]. Journal of constructional steel research, 2013, 81: 62 - 75.
- [ 11 ] VERISSIMO G S, PAES J L R, VALENTE I, et al. Design and experimental analysis of a new shear connector for steel and concrete composite structures [C] // International conference on bridge maintenance, safety and management, 2006.
- [ 12 ] 李现辉, 李国强. 腹板嵌入式组合梁中抗剪连接件抗冲击试验[J]. 建筑钢结构进展, 2009, 11(3): 19 - 22.  
(LI Xianhui, LI Guoqiang. The experiment on the performance of the shear connector in embedded composite beams to resist punching [J]. Progress in steel building structures, 2009, 11(3): 19 - 22. )
- [ 13 ] 李国强, 司林军, 李现辉, 等. 腹板嵌入式组合梁抗剪性能试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(4): 482 - 487.  
(LI Guoqiang, SI Linjun, LI Xianhui, et al. Experimental study on shear capacity of embedded composite beam with notched web [J]. Journal of tongji university (natural science), 2011, 39(4): 482 - 487. )
- [ 14 ] 张自荣, 秦力. 混凝土结构: 混凝土结构设计原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
(ZHANG Zirong, QIN Li. Concrete structure: design principle for concrete structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. )
- [ 15 ] 曹学亮, 李法雄, 雷俊卿, 等. 基于 ABAQUS 的开孔板连接件抗剪承载力分析[J]. 公路交通科技, 2013, 30(11): 89 - 95.  
(CAO Xueliang, LI Faxiong, LEI Junqing, et al. Analysis of shear-capacity of perfo-bond shear connectors based on ABAQUS software [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2013, 30(11): 89 - 95. )
- [ 16 ] ANDERSON D. Eurocode4-design of composite steel and concrete structures [M]. Germany: Springer berlin heidelberg, 2014.
- [ 17 ] 陈建兵, 尤元宝, 万水. 钢 - 混凝土组合梁开孔波折板连接件受剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(4): 115 - 123.  
(CHEN Jianbing, YOU Yuanbao, WAN Shui. Experimental study on shear behavior of perforated corrugated plate connectors in steel and concrete composite beam [J]. Journal of building structures, 2013, 34(4): 115 - 123. )
- [ 18 ] 薛伟辰, 代燕, 周良, 等. 开孔板连接件受剪性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2009, 30 (5): 103 - 111.  
(XU Weichen, DAI Yan, ZHOU Liang, et al. Experimental studies on shear behavior of perfo-bond connectors [J]. Journal of building structures, 2009, 30(5): 103 - 111. )