

# 多向受力状态焊钉连接件受力特性分析

赵敏, 逯文茹

长安大学公路学院, 西安 710064

**摘要** 鉴于索塔锚固结构中焊钉受力状态的特殊性,对混凝土竖向承压、水平力及两者共同作用下焊钉连接件的受力特性进行研究。通过对单钉推出试验进行有限元分析,验证了有限元模拟方法的正确性。采用有限元方法,研究了在混凝土竖向承压、水平力及两者共同作用下,焊钉连接件抗剪承载力、剪切刚度以及焊钉变形、应力的变化规律。研究表明,混凝土竖向承压对焊钉连接件抗剪承载力和剪切刚度均产生影响;在幅值变化相同的情况下,水平拉力的变化对焊钉极限承载力的影响显著,而水平压力的变化则对焊钉剪切刚度的作用明显;两种受力状态下焊钉变形和应力分布规律相近;混凝土竖向承压和水平力共同作用下,钢板与混凝土接触状态不同,焊钉连接件抗剪承载力和剪切刚度的变化规律则不同。

**关键词** 桥梁工程;组合结构桥梁;索塔锚固结构;焊钉连接件;受力特性

**中图分类号** TU398.9

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.10.013

## Mechanical Features of Stud Connector under Loading Conditions

ZHAO Min, LU Wenru

School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China

**Abstract** Because of the special stress conditions of studs in cable-pylon composite anchor structure, it is necessary to study the mechanical features of studs under the vertical pressure of concrete pylon and the horizontal force and their interactions. The stud push-out test is analyzed by finite element method (FEM) and the simulation is validated by the experimental results. Based on FEM, this paper studies the shear capacity, shear stiffness, deformation and stress distribution of studs under loading conditions which are the vertical pressure of concrete pylon and horizontal force and their interactions. The results show that the vertical pressure affects the shear capacity and shear stiffness of studs. In the case with the same amplitude variation, changes of the horizontal tension affects the shear capacity of stud significantly, while changes of horizontal pressure affects the shear stiffness of studs significantly. Under the two loading conditions, the deformation and stress distribution of studs performs in the similar way. Under the interaction of the vertical pressure and horizontal force, the variation patterns of shear capacity and shear stiffness of studs are different, while the contact conditions of steel and concrete are different.

**Keywords** bridge engineering; steel-concrete composite structure bridge; cable-pylon composite anchor structure; stud connector; mechanical features

焊钉因其抗剪性能不具方向性、制作简单和施工方便,被广泛应用在组合梁、混合梁、索塔锚固结构等组合桥梁结构中。随着组合结构型式的发展和变化,焊钉的受力状态由仅承担剪力的单一受力变为剪力和轴向力(拉拔或压力)共同作用的多向受力,同时焊钉的外裹混凝土也处于受拉或受压状态。自1954年美国Illinois大学Viest<sup>[1]</sup>首次开展焊钉连接

件的研究以来,针对焊钉连接件的受力特性和抗剪承载力已开展了大量的试验和理论研究<sup>[2-4]</sup>,提出了较为成熟的焊钉连接件承载力计算方法。然而,目前的成果多为基于组合梁桥焊钉连接件的研究得到的。针对承受巨大索力的组合索塔锚固结构中的焊钉连接件,其处于外裹混凝土承压和水平力共同作用的受力状态,现有的研究成果是否仍然适用是一个

收稿日期:2013-12-30;修回日期:2014-02-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51378069)

作者简介:赵敏,博士研究生,研究方向为钢结构与组合结构桥梁,电子信箱:zhaomin566@163.com

引用格式:赵敏,逯文茹.多向受力状态焊钉连接件受力特性分析[J].科技导报,2014,32(10):74-79.

值得研究的问题。

有鉴于此,本研究选取组合索塔锚固结构常见的焊钉类型,建立焊钉连接件的弹塑性有限元模型,对单钉推出试件进行模拟分析,在验证有限元模拟方法正确的基础上,模拟混凝土竖向承压、水平力和两者共同作用的受力状态,研究焊钉连接件的抗剪承载力、剪切刚度及不同荷载条件下焊钉的变形和应力分布规律,以为索塔锚固结构焊钉设计方法的研究提供理论依据。

## 1 理论模型及验证

### 1.1 理论模型

采用Ansys软件对文献[5]中的单钉推出试件进行模拟分析,混凝土采用实体单元solid65模拟,加载钢梁和焊钉采用实体单元solid185模拟,普通钢筋采用杆单元link8模拟。依据钢构件与混凝土界面实际接触状态为“受压时相互接触不穿透,受拉时允许脱开”。钢构件与混凝土接触采用接触单元conta174和目标单元targe170模拟,计入摩擦系数0.2。有限元模型如图1所示。

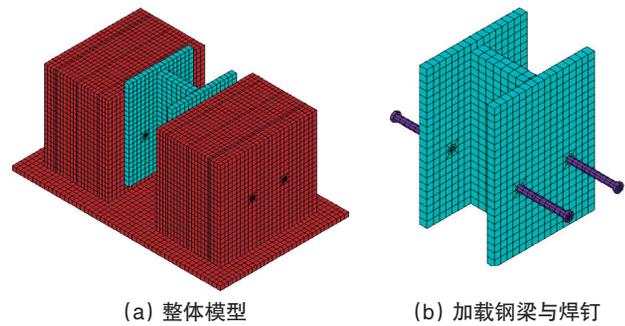


图1 有限元模型

Fig. 1 Finite element model

有限元模型计入材料非线性、混凝土材料采用多线性等向强化模型MISO模拟,单轴应力应变曲线上升段采用混凝土结构设计规范规定的公式,下降段则采用Hognestad的处理方法;普通钢筋采用理想塑性本构关系,加载钢梁和焊钉采用双线性的等向强化模型MISO模拟。材料特性参数根据文献[5]中试验模型材性试验结果选用,混凝土材料150 mm,立方体抗压强度55.7 MPa(表1)。

表1 钢构件材料性能

Table 1 Material properties of steel components

构件名称	屈服强度 $f_y$ /MPa	抗拉强度 $f_t$ /MPa	弹性模量 $E$ /GPa	切线模量	泊松比 $\nu$
加载钢梁	345	480	210	0.03E	0.3
焊钉	369	498	210	0.06E	0.3
普通钢筋	335	/	200	/	0.3

注:焊钉材料性能参照文献[6]研究结果。

推出试验中混凝土块下铺设砂浆垫层,为模拟真实边界条件,有限元模型中混凝土底面与垫层采用接触单元模拟,同时约束加载钢梁的平面位移。推出荷载通过在加载钢梁翼缘顶面施加面荷载模拟。由于考虑材料非线性和接触单元,模型分析为非线性静力分析过程,非线性方程组选用New-Raphson迭代法,采用位移收敛准则,收敛误差控制在1.5%。

### 1.2 理论模型的验证

文献[5]单钉推出试验共制作了3个相同试件分别为SE-1~3。基于目前常用的4种计算焊钉剪切刚度的方法<sup>[7-10]</sup>,选

择0.8 mm割线法计算剪切刚度(本文中剪切刚度均由0.8 mm割线法确定)。将单钉推出试件试验结果与有限元模型计算结果对比分析,验证有限元模型的正确性,如表2所示。

分析结果表明,有限元模拟的焊钉连接件的破坏形态与实际推出试验的破坏形态相同,即焊钉根部被剪断,混凝土在焊钉根部有局部压碎现象,但未出现明显开裂。如表2所示,有限元模型得到的焊钉连接件抗剪极限承载力与试验结果相比差值为8%,剪切刚度较试验结果差值为9%。由此可见,本有限元模拟方法可靠。

表2 单钉推出试件试验和有限元计算结果对比

Table 2 Comparison of results obtained from tests and finite element analysis(FEA)

试件	极限承载力 $V_u$ /kN				剪切刚度 $K$ /(kN·mm <sup>-1</sup> )			
	试验 $V_u$	试验均值	FEA $V_u$	差值/%	试验 $K$	试验均值	FEA $K$	差值/%
SE-1	225				148			
SE-2	230	242	222	8	190	165	150	9
SE-3	270				156			

## 2 竖向承压状态下焊钉连接件受力特性分析

为讨论混凝土承压状态下焊钉受力性能的变化,有限元模型中约束混凝土底面节点三向位移,以避免混凝土块的掀起<sup>[1]</sup>;采用索塔常用C50混凝土材料,其余模拟均与上节有限元模型相同。选取常见索塔锚固节段顶面竖向压力( $p_v$ )变化范围185~5606 kN/m<sup>2</sup>,对应有限元模型混凝土块顶面施加面荷载范围为185~5606 kN/m<sup>2</sup>。从中选取混凝土块顶面竖向压力0、1650、3000、4500、5606 kN/m<sup>2</sup> 5个荷载参数进行有限元计算,对焊钉连接件的抗剪承载力和剪切刚度推出荷载( $P$ )80 kN(无竖向压力作用时1/3极限承载力)和极限承载状态焊钉的变形和应力进行对比分析。模拟混凝土承压状态模型加载如图2所示。

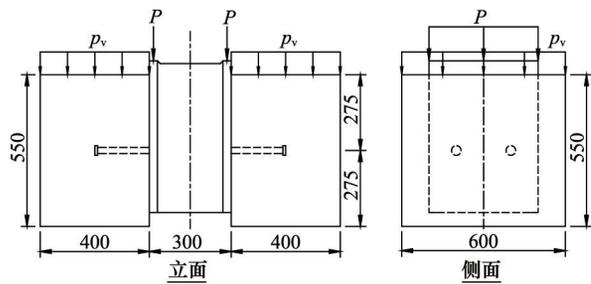


图2 混凝土承压状态加载模型(mm)

Fig. 2 Loading model of vertical pressure of concrete(mm)

图3为不同竖向压力作用下焊钉连接件抗剪承载力和剪切刚度的变化曲线。随着混凝土顶部竖向压力的增加,焊钉的抗剪承载力和剪切刚度逐渐增大,基本呈线性变化;当竖向压力由0增大至5606 kN/m<sup>2</sup>时,连接件抗剪承载力由240 kN变化至288 kN,剪切刚度由147 kN/mm变化至163 kN/mm,连接件抗剪承载力提高了20%,剪切刚度仅提高了10%。在竖向压力和推出荷载共同作用下,焊钉连接件的破坏形态为焊钉根部的剪断破坏。分析表明,混凝土顶部竖向压力的存在提高了焊钉连接件抗剪承载力和剪切刚度,并且竖向压力的作用对焊钉连接件极限承载力的影响较其对剪切刚度的影响明显。

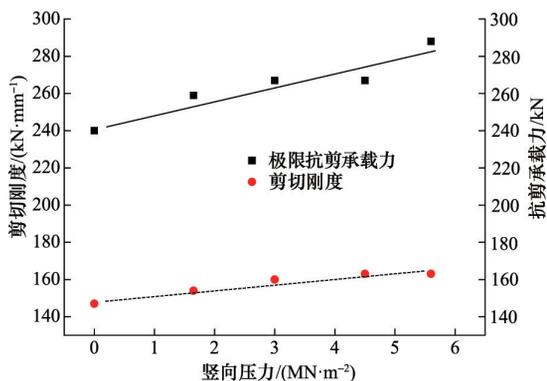


图3 竖向压力对焊钉连接件抗剪承载力和剪切刚度的影响

Fig. 3 Effect of vertical pressure of concrete on the shear capacity and shear stiffness of studs

图4为不同竖向压力作用下焊钉竖向变形的变化曲线。当推出荷载为80 kN时,随着竖向压力的增大,焊钉的变形量略有减小,由此说明混凝土顶部竖向压力的存在使得焊钉周围混凝土对其约束力变大,相应的焊钉变形减小。由于混凝土竖向压力对模型承载力的贡献作用,随着竖向压力的增大连接件破坏时焊钉的变形能力增大。在不同竖向压力作用和不同推出荷载的作用下,焊钉变形沿其长度方向分布规律始终保持不变,即焊钉变形由焊接端逐渐减小,在80~200 mm区段内焊钉的位移很小(近似为0)。

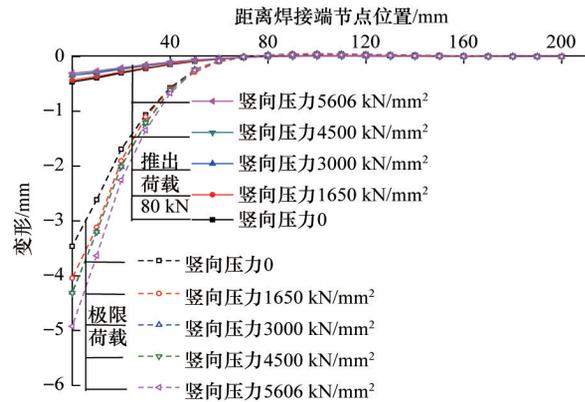


图4 竖向压力对焊钉变形的影响

Fig. 4 Effect of vertical pressure of concrete on deformation of studs

图5为不同竖向压力作用下焊钉剪应力的变化曲线。当推出荷载为80 kN时,剪应力在焊接端0~50 mm范围内显著减小,距焊接端50 mm附近减小至0,之后剪应力反向增大,但其值很小,最大值小于14 MPa,在距焊接端140 mm附近剪应力再次减少至0;并且随着竖向压力的增大,对应位置焊钉的剪应力值略有减小。当各焊钉连接件达到极限承载状态时,不同竖向压力作用下,对应位置焊钉的剪应力基本相同;且剪应力沿焊钉长度方向的分布规律与推出荷载80 kN时对应的分布规律基本相同。

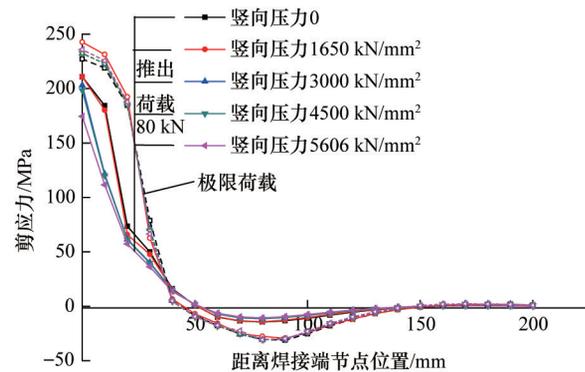


图5 竖向压力对焊钉剪应力的影响

Fig. 5 Effect of vertical pressure of concrete on shear stress of studs

图6为不同竖向压力作用下焊钉正应力的变化曲线。当推出荷载为80 kN时(图6(a)),焊钉在焊接端0~20 mm范围内上下缘正应力减小,且上缘表现为压应力、下缘表现为拉应力,距焊接端20 mm附近正应力减小至0,之后上下缘正应力反向增大,在距焊接端140 mm附近正应力再次减小近似

为0;随着竖向压力的增大,对应位置焊钉的正应力减小。当各剪力连接件达到极限承载状态时(图6(b)),不同竖向压力作用下,对应位置焊钉的正应力相同;且焊钉正应力沿长度方向的分布规律与推出荷载80 kN时对应的分布规律基本相同。

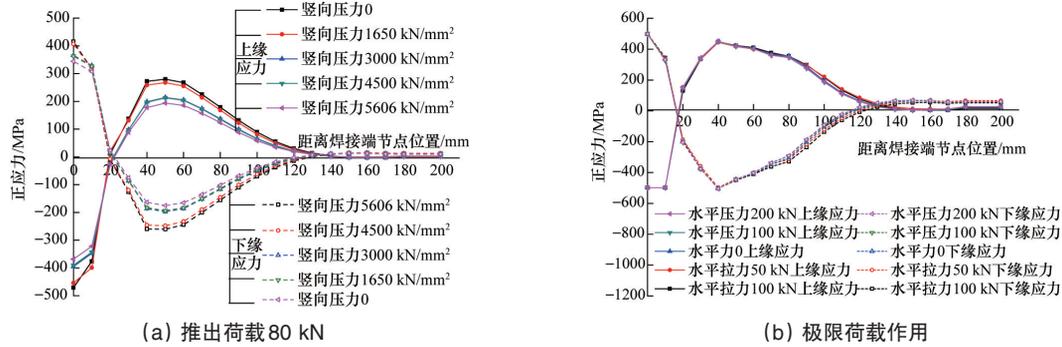


图6 竖向压力对焊钉正应力的影响

Fig. 6 Effect of vertical pressure of concrete on normal stress of studs

### 3 水平力作用下焊钉连接件受力特性分析

分析水平拉力50、100 kN,无水平力,水平压力100、200 kN作用下,焊钉连接件抗剪承载力和剪切刚度,以及推出荷载60 kN(无水平力作用时1/3极限承载力)和极限承载状态焊

钉的变形及应力分布变化规律。为保证水平力作用下混凝土块自由滑动,混凝土底面与垫层间的摩擦系数为0。推出荷载 $P$ 与水平力 $F_H$ 加载示意如图7,其中以图示方向表示水平压力,反之为水平拉力。

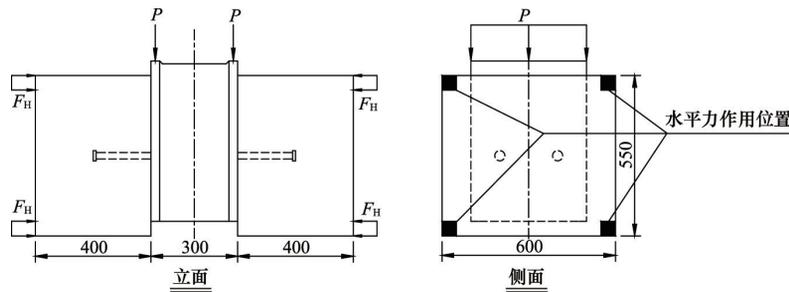


图7 水平力加载模型(mm)

Fig. 7 Loading model of the horizontal force (mm)

图8为不同水平力作用下焊钉连接件抗剪承载力和剪切刚度的变化曲线,其中横坐标负值表示为水平压力,正值为水平拉力。焊钉连接件抗剪承载力随着水平压力的增大而增大,随着水平拉力的增大而减小,基本呈线性变化;当水平压力由0变化至200 kN时,抗剪承载力由180 kN增加至322 kN,提高了79%;当水平拉力由0变化至100 kN时,抗剪承载力由180 kN减少至141 kN,降低了22%。焊钉连接件剪切刚度随着水平压力的增大而增大,随着水平拉力的增大而减小;当水平压力由0变化至200 kN时,剪切刚度由101 kN/mm变化至226 kN/mm,增大了1.24倍;当水平拉力由0变化至100 kN时,剪切刚度由101 kN/mm变化至89 kN/mm,减小了12%。由此可见,水平压力的作用增大了钢板与混凝土界面的压力,使得钢板与混凝土间的摩擦力增大,进而协助焊钉承担了更多的竖向推力并减小了钢混间的相对滑移,焊钉连接件的抗剪承载力和剪切刚度得到提高;水平拉力的存在对降低焊钉连接件抗剪承载力效果明显,水平压力的存在则对

提高焊钉连接件剪切刚度的作用显著。在无水平力和水平压力作用下,焊钉连接件最终破坏形式为焊钉根部剪断;而水平拉力作用下,由于焊钉的拉拔作用导致焊钉钉帽附近和杆部周围大面积混凝土主拉应力超过混凝土抗拉强度标准值,焊钉连接件最终破坏形式为混凝土开裂。

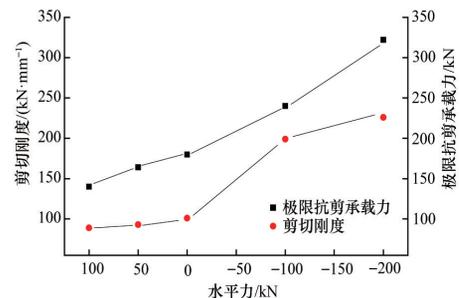


图8 水平力对焊钉连接件抗剪承载力和剪切刚度的影响  
Fig. 8 Effect of horizontal force on the shear capacity and shear stiffness of studs

图9为不同水平力作用下焊钉竖向变形的变化曲线。当推出荷载为60 kN时,随着水平压力的增大,焊钉变形量明显减小,由此可见钢板与混凝土间的摩擦承担了较多的竖向推力;而随着水平拉力的增大,相比无水平力作用状态焊钉的变形则略微增大;此时焊钉竖向变形沿长度方向分布规律与上节混凝土承压状态焊钉变形分布规律相同。当焊钉连接件破坏时,承受水平拉力的焊钉由于拉弯的受力状态对应的变形量较大,而无水平力和水平压力作用对应焊钉变形与上节连接件破坏时混凝土承压状态焊钉变形分布规律相同。

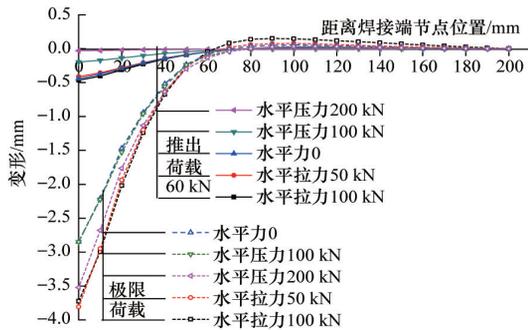


图9 水平力对焊钉变形的影响

Fig. 9 Effect of horizontal force on deformation of studs

图10为不同水平力作用下焊钉剪应力的变形曲线。当推出荷载为60 kN时,焊钉剪应力沿长度方向分布规律与上节混凝土承压状态焊钉剪应力分布规律基本相同,在焊接端0~50 mm范围内剪应力显著减小,距焊接端50 mm附近剪应力减小至0,之后剪应力反向增大,但其值很小最大值小于13 MPa,在距焊接端140 mm附近剪应力再次减少至0;并随着水平压力的增加,焊钉对应位置剪应力减小。当剪力连接件达到极限承载状态时,发生剪断破坏形态的连接件焊钉对应剪应力比较接近,承受水平拉力100 kN的连接件对应焊钉的剪应力最小;焊钉剪应力沿长度方向分布基本与推出荷载60 kN时相同。

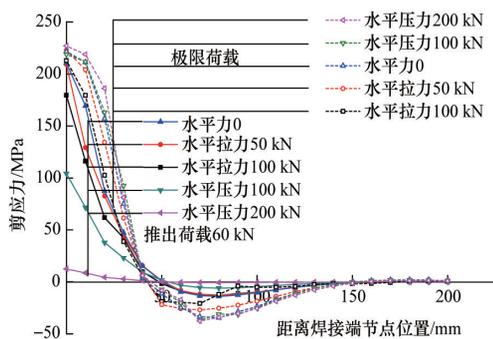
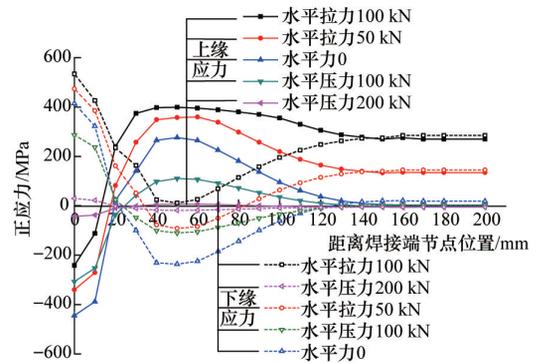


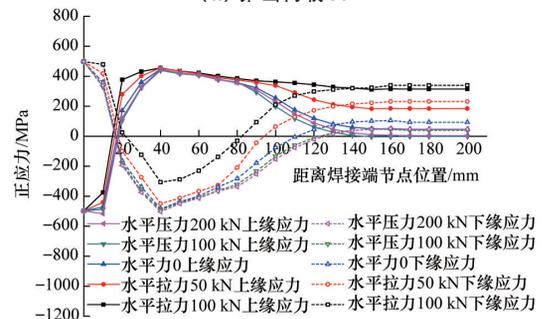
图10 水平力对焊钉剪应力的影响

Fig. 10 Effect of horizontal force on shear stress of studs

图11为不同水平力作用下焊钉正应力的变化曲线。由于水平拉力的作用,焊钉大部分区域处于受拉状态,而水平压力作用下,由于混凝土协助焊钉承压,水平压力对焊钉正应力影响很小;然而扣除水平力的影响,焊钉的上下缘正应力分布规律基本与无水平作用时焊钉正应力分布一致,并且与混凝土承压状态焊钉正应力分布特点相似。



(a) 推出荷载 60 kN



(b) 极限荷载作用

图11 水平力对焊钉正应力的影响

Fig. 11 Effect of horizontal force on normal stress of studs

#### 4 多向受力状态焊钉连接件受力特性分析

鉴于索塔锚固结构中焊钉的实际受力状态,采用与以上节相同的有限元模型,分析在混凝土竖向承压、水平拉力或压力和推出荷载共同作用下,焊钉连接件的抗剪承载力和剪切刚度的变化规律。

如图12为多向受力状态下焊钉连接件抗剪承载力和剪切刚度的变化规律。承受水平拉力和无水平力作用的焊钉连接件,随着混凝土竖向压力的增大,连接件抗剪承载力减小,而剪切刚度不变;在水平拉力50 kN作用下,混凝土顶部竖向压力由0增大至5606 kN/m<sup>2</sup>时,抗剪承载力由164 kN减小至140 kN;无水平力作用时,当混凝土顶部竖向压力由0增大至5606 kN/m<sup>2</sup>时,抗剪承载力由180 kN减小至141 kN。当水平压力作用时,随着混凝土竖向压力的增大,连接件抗剪承载力和剪切刚度均有增加;在水平压力100 kN时,混凝土顶部竖向压力由0增大至5606 kN/m<sup>2</sup>时,抗剪承载力由240 kN增加至255 kN,剪切刚度则由199 kN/mm增大至206 kN/mm。

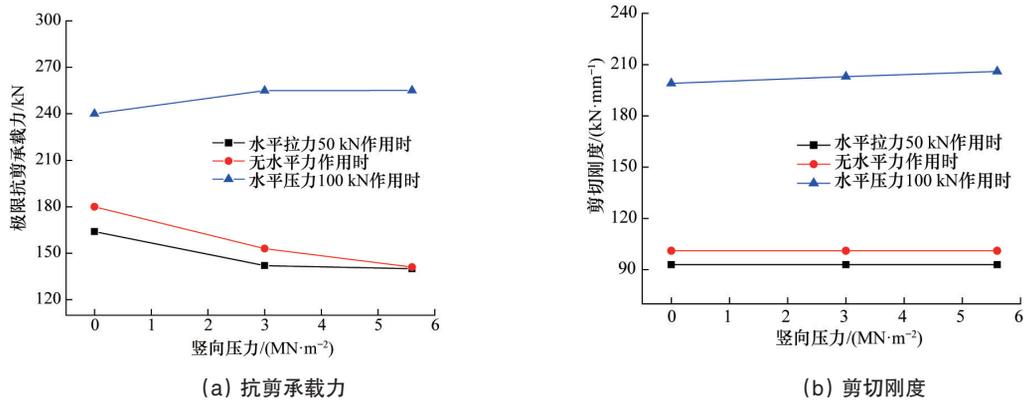


图12 混凝土竖向承压和水平力共同作用对焊钉连接件抗剪承载力和剪切刚度的影响

Fig. 12 Effect of interaction of vertical pressure of concrete and horizontal force on the shear capacity and shear stiffness of studs

钢板与混凝土块间的摩擦力对焊钉连接件的抗剪承载力和剪切刚度影响显著,作用于焊钉连接件的竖向荷载由界面摩擦和焊钉本身共同承担。混凝土顶面的竖向压力作用增大了混凝土对焊钉的约束力,水平压力则提高了钢板与混凝土界面压力,进而焊钉连接件的承载能力和剪切刚度增加;而在水平拉力或无水平力作用时(允许混凝土平面滑动),钢板与混凝土块界面脱离,混凝土顶面的竖向压力加剧了混凝土块的偏心受压状态,焊钉拉拔作用明显,焊钉周围混凝土开裂,焊钉连接件承载力降低。

## 5 结论

1) 相对于仅承担推出荷载的焊钉连接件,混凝土竖向承压和水平力作用对焊钉竖向变形、剪应力和上下缘正应力(扣除水平力的影响后)沿其长度的分布规律无明显影响。焊钉竖向变形由焊接端逐渐减小,在80~200 mm区段内焊钉的位移很小近似为0;剪应力在焊接端0~50 mm范围内显著减小,距焊接端50 mm附近减小至0,之后剪应力反向增大但其值很小,在距焊接端140 mm附近剪应力再次减少至0;上下缘正应力在焊接端0~20 mm范围内明显减小,距焊接端20 mm附近正应力减小至0,之后上下缘正应力反向增大,在距焊接端140 mm附近正应力再次减小至0。

2) 随着作用于混凝土顶面的竖向压力的增大,焊钉连接件的抗剪承载力和剪切刚度随之增加。在推出荷载作用早期,焊钉的变形和应力随着竖向压力的增加而减少;而在连接件极限承载状态,不同竖向压力下焊钉应力趋于一致。

3) 随着水平压力的增大,焊钉连接件的抗剪承载力和剪切刚度明显增加;而随着水平拉力的增大,其抗剪承载力和剪切刚度均有减小;并且在水平力幅值变化相同的情况下,水平拉力的变化对焊钉连接件极限承载力的影响显著,而水平压力的变化则对其剪切刚度的作用明显。在推出荷载作用早期,焊钉的变形和应力随着水平压力的增加而减少。

4) 在混凝土竖向压力、水平拉力或无水平力以及推出荷载共同作用下,焊钉连接件的抗剪承载力减小而剪切刚度不

变;在混凝土竖向压力、水平压力以及推出荷载共同作用下,焊钉连接件的抗剪承载力和剪切刚度均略有提高。

## 参考文献(References)

- [1] Viest I M. Investigation of stud shear connectors for composite concrete and steel t-beams[J]. Journal of the American Concrete Institute, 1956, 52(4): 875-892.
- [2] Oehlers D J, Johnson R P. Strength of stud connections in composite beams[J]. The Journal of Structural Engineering, 1987, 65B(2): 44-48.
- [3] 聂建国, 谭英, 王洪全. 钢-高强混凝土组合梁栓钉抗剪连接件的设计计算[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1999, 39(12): 94-97. Nie Jianguo, Tan Ying, Wang Hongquan. Strength of stud shear connectors in composite steel-HC beams [J]. Journal Tsinghua University: Science and Technology, 1999, 39(12) :94-97.
- [4] 郑则群, 房贞政. 剪力连接件对预应力钢-混凝土组合梁受力性能的影响[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2001, 29(1): 74-77. Zheng zequn, Fang Zhenzheng. The influence of the shear connectors on the stress behavior of prestressed composite steel-concrete beams[J]. Journal of Fuzhou University: Nature Science, 2001, 29(1):74-77.
- [5] 张喜刚, 刘玉擎. 组合索塔锚固结构[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010: 16-20. Zhang Xigang, Liu Yuqing. Cable-tower composite anchorage[M]. Beijing: China Communications Press, 2010: 16-20.
- [6] Shim C S, Lee P G, Yoon T Y. Static behavior of large stud shear connectors[J]. Engineering Structures, 2004, 26(12): 1853-1860.
- [7] 刘玉擎. 组合结构桥梁[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 25-28. Liu Yuqing. Composite structure bridge[M]. Beijing: China Communications Press, 2005: 25-28.
- [8] European Committee for Standardization. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures-Part.1: General rules for buildings[S]. Bruselas: European Committee for Standardization, 1994.
- [9] Wang Y C. Deflection of steel-concrete composite beams with partial shear interaction[J]. Journal of Structure Engineering, 1998, 124(10): 1159-1165.
- [10] Oehlers D J, Coughlan C G. The shear stiffness of stud shear connections in composite beams[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1986, 6(4): 273-284.
- [11] 聂建国, 刘明, 叶列平. 钢-混凝土组合结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 79-80. Nie Jianguo, Liu Ming, Ye Lieping. Steel-concrete composite structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011: 79-80.

(责任编辑 侯澄芝)