

剪力钉连接件拉剪共同作用抗剪性能

安 然, 王有志

(山东大学 土建与水利学院, 济南 250061)

摘要:为明确剪力钉连接件在拉剪荷载作用下的力学性能,开展了5组受拉、受剪和拉剪共同作用模型试验,结合有限元模型,探讨了混凝土强度和剪力钉尺寸对抗剪承载力的影响,提出了拉剪共同作用剪力钉连接件荷载-滑移关系式和抗剪承载力计算公式。结果表明:当拉力施力比从0增到0.6时,剪切刚度下降69%,弹性极限荷载与抗剪承载力的比值从0.55下降至0.24,抗剪承载力下降31%;混凝土强度和拉力施力比对剪力钉抗剪承载力的影响具有相关性。本文提出的拉剪共同作用剪力钉连接件荷载-滑移关系式和抗剪承载力计算公式可应用于工程设计和计算。

关键词:桥梁工程;钢-混组合梁;剪力钉连接件;剪切刚度;荷载-滑移曲线;抗剪承载力

中图分类号:U443.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2023)09-2554-09

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20211243

Shear properties of shear stud connectors under combined tension and shear loading

AN Ran, WANG You-zhi

(School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: In order to understand the mechanical properties of shear stud connectors under combined tension and shear loading, five groups of model tests were tested, including uniaxial pull-out tests, uniaxial push-out tests, and combined tension and shear loading tests. Combined with finite element models, influence of concrete strength and stud size on shear capacity were analyzed, and the load-slip relationship, the ultimate shear capacity formula of shear stud connectors under tension and shear loading were proposed. The results show that as the applied tensile force ratio increase to 0.6, the shear stiffness reduces 69%; and the ratio of ultimate elastic capacity to ultimate shear capacity reduces from 0.55 to 0.24, and the ultimate shear capacity reduces 31%. The effects of concrete strength and tensile force ratio on the shear capacity of shear stud connectors are correlated. The proposed load-slip relationship and ultimate shear capacity formula under tension and shear loading can be applied to engineering design and calculation.

Key words: bridge engineering; steel concrete composite beam; shear stud connector; shear stiffness; load-slip curve; ultimate shear capacity

收稿日期:2021-11-18.

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51578325).

作者简介:安然(1989-),男,工程师,博士研究生.研究方向:钢-混组合梁.E-mail:375826500@qq.com

通信作者:王有志(1964-),男,教授,博士.研究方向:桥梁加固.E-mail:wyz96996@163.com

0 引言

剪力钉连接件广泛应用于钢-混凝土组合梁桥中^[1,2],为抵抗钢梁和混凝土板的相对滑移和竖向分离,剪力钉处于拉剪复合受力状态,特别是在负弯矩区,会承受较大的拉力作用^[3]。同时,在组合梁锚固区、混合梁结合段,剪力钉在抗剪的同时也承受一定拉力作用^[4]。研究表明,剪力钉的抗剪承载力随拉力的增大而下降^[5,6],中国规范尚未对拉剪共同作用剪力钉的承载性能做出规定。

现有剪力钉连接件拉剪共同作用研究多是基于改进推出试验^[7-11]。Shen等^[12]的试验结果表明,当拉剪比为0.267时,剪力钉抗剪承载力下降约10%。Saari等^[10]、Mirza等^[13]通过模型试验和有限元分析得出,混凝土强度和箍筋形式对拉剪共同作用下剪力钉的承载能力和破坏模式有较大影响。Mcmackin等^[14]提出了剪力钉拉力-剪相关关系式,但所用混凝土强度较低。蔺钊飞等^[11]对上述关系式做了改进。以上研究对拉剪共同作用剪力钉连接件抗剪性能做了大量有价值的研究工作,但研究重点均放在抗剪承载力的影响上,未考虑剪力钉的弹性剪切性能,也未考虑多因素的共同影响。

本文通过5组单轴受剪、单轴受拉^[4,15]和拉剪共同作用模型试验,结合有限元分析,系统研究了拉剪共同作用下剪力钉连接件的弹性剪切性能和抗剪承载力,分析了拉剪作用下混凝土强度、剪力钉尺寸对承载性能的影响规律。基于试验和有限元结果,提出了拉剪共同作用剪力钉连接件荷载-滑移关系式和抗剪承载力计算公式。研究内容可为相关设计和计算提供依据。

1 模型试验设计

1.1 试件尺寸与材料参数

模型试验采用桥梁建设中常用的C60高强混凝土,试验前按式(1)规定的构造要求对试件进行验算^[16],以避免出现混凝土先于剪力钉破坏现象。

$$h_{ef}/d \geq \left[(-1.48f_c + 241)d + (-27.6f_c + 4770) \right] / 100 \quad (1)$$

式中: h_{ef} 为钉杆长度,mm; d 为钉杆直径,mm; f_c 为混凝土抗压强度,MPa。

试件按EC4标准设计^[17],钢梁为Q235B型

钢;在钢梁两侧翼缘中心对称焊接一对ML15AL圆柱头剪力钉,剪力钉抗拉强度 $f_u=481.3$ MPa。混凝土内置HRB335钢筋,直径为12 mm。图1为试件尺寸图。

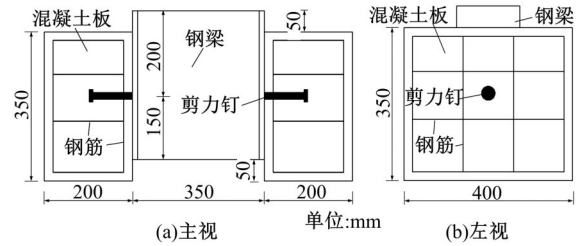


图1 试件尺寸

Fig. 1 Dimension of specimens

试验设置1组单轴受剪试件(编号 S_1)、1组单轴受拉试件(编号 P_1)、3组不同拉力施力比的拉剪共同作用试件(编号 $PS_1 \sim PS_3$)。试验前对混凝土进行28 d同步力学性能试验。试验参数如表1所示。表1中, h 为剪力钉长度; λ 为拉力施力比, $\lambda=T/T_u$, T 为试验加载拉力, T_u 为试件的单轴抗拉承载力。

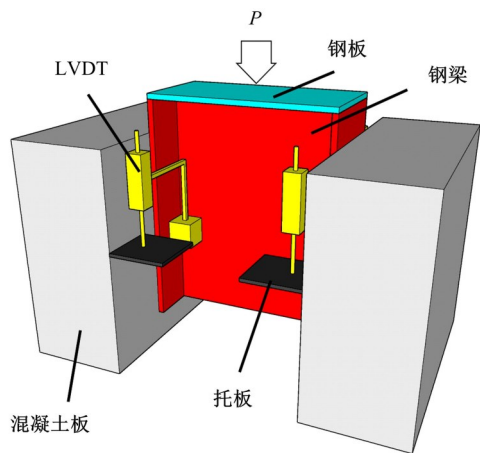
表1 试验参数

Table 1 Parameters of test

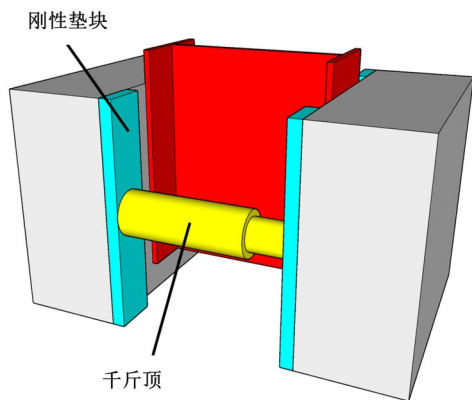
试件编号	混凝土抗压强度 f_c /MPa	剪力钉规格 $d \times h$	配筋	λ
S_{1-1}, S_{1-2}	66.34			0
PS_{1-1}, PS_{1-2}	63.02	16 mm × 90 mm	$\phi 12@110$	0.4
PS_{2-1}, PS_{2-2}	58.93			0.5
PS_{3-1}, PS_{3-2}	60.44			0.6
P_1	62.07			—

1.2 加载及量测方案

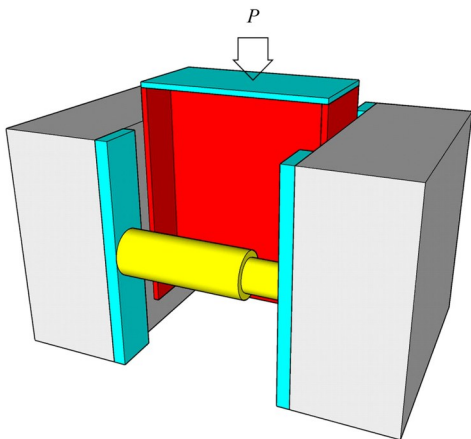
图2为加载布置图。单轴受剪试验采用1000 kN万能试验机,在工字钢梁上垫一块钢板,混凝土底面铺一层细砂垫层以保证受力均匀。试验前以40%的计算承载力^[17,18]对试件反复预加载,破坏混凝土板与钢梁之间的黏结作用。正式试验时按每10 kN一级分级加载,每级荷载持荷2 min,加载后期试件发生明显塑性变形后,每级荷载缩小至5 kN,直至试件破坏。单轴受拉试验采用2个10 t液压千斤顶施加拉力,千斤顶对称放置在试件两侧剪力钉的高度位置,两端通过刚性垫块顶在混凝土表面,以保证受力均匀。试验时同步分级加载2个千斤顶,每级荷载5 kN,持荷2 min,直至试件破坏。拉剪试验参照上述过程,2个千斤顶分级同步加载至设计拉力值,然后施加



(a)单轴受剪试验



(b)单轴受拉试验



(c)拉剪共同作用试验

图 2 试验布置

Fig. 2 Test set-up

剪力直至试件破坏,加载过程中千斤顶拉力值保持不变。将位移传感器(Linear variable differential transformer, LVDT)底座吸附在钢梁剪力钉高度位置,将托板同样固定在混凝土板剪力钉高度位置。LVDT 顶在托板上测量混凝土和钢梁之间的相对滑移。每个试件对称布置 4 个 LVDT。

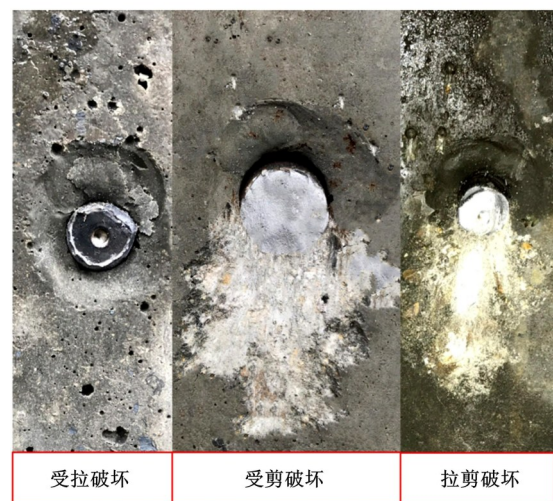
2 试验结果分析

2.1 试件破坏形态

图 3 为不同荷载工况下试件的破坏形态。由图 3 可知,单轴受拉破坏形态为剪力钉根部拉断,断面平整,且有颈缩现象;单轴受剪试件的破坏形态为单侧剪力钉根部剪断,剪力钉上侧与混凝土分离,下侧混凝土被局部压碎;拉剪共同作用试件的破坏均为单侧剪力钉剪断,破坏断面距根部有一定距离,破坏前滑移量迅速增大,有明显横向变形。混凝土由于强度较高,加上箍筋的约束作用,整体完好,表面无可见裂缝。



(a)栓钉断面



(b)混凝土断面

图 3 试件破坏形态

Fig. 3 Failure modes of specimens

2.2 抗剪性能分析

试验结果如表 2 所示。其中, V 为拉剪共同作用抗剪承载力; V_u 为 S_1 试件单轴抗剪承载力; s_u 为试件的最终滑移值; k_e 为弹性剪切刚度, V_e 为弹

性极限荷载,分别定义为荷载-滑移曲线上滑移为 0.2 mm 处对应的割线斜率和荷载值^[19]。由表 2 可知,拉剪共同作用下,剪力钉连接件的弹性剪切性能大幅下降,相比于单轴受剪试件 S₁,λ 为 0.4、0.5 和 0.6 时,PS₁、PS₂ 和 PS₃ 试件的弹性剪切刚

度分别下降了 47%、61% 和 69%,V_e/V 从 0.55 分别下降至 0.35、0.27 和 0.24,表明拉力存在时剪力钉会更快、更早地进入塑性变形阶段;试件的抗剪承载力也明显下降,分别降低了 16%、23% 和 31%。

表 2 试验结果

Table 2 Test results

试件	T/kN	T _u /kN	λ(λ=T/T _u)	V/kN	V _u /kN	V/V _u	s _u /mm	k _c /(kN•mm ⁻¹)	V _e /V
S ₁₋₁	—	—	0.00	199.8	205.0	1.00	4.982	557.8	0.54
S ₁₋₂	—	—	0.00	210.0	205.0	1.00	4.122	565.5	0.56
PS ₁₋₁	33	—	0.40	176.2	205.0	0.86	4.686	299.5	0.34
PS ₁₋₂	33	—	0.40	168.4	205.0	0.82	6.015	290.2	0.35
PS ₂₋₁	41	—	0.50	162.3	205.0	0.79	5.672	210.6	0.26
PS ₂₋₂	41	—	0.50	154.7	205.0	0.75	4.714	232.0	0.30
PS ₃₋₁	50	—	0.60	145.3	205.0	0.70	3.948	167.1	0.22
PS ₃₋₂	50	—	0.60	140.4	205.0	0.68	5.312	182.5	0.26
P ₁	—	82.3	—	—	—	—	—	—	—

3 有限元分析

3.1 模型建立

采用 Abaqus 建立有限元模型,如图 4 所示。由于试件的对称性,取 1/2 模型进行分析,模型尺寸与试验一致。混凝土、钢梁、剪力钉采用 C3D8R 单元,

钢筋采用 T3D2 单元,为保证网格的连续性,钢梁和剪力钉建成一个整体。混凝土采用塑性损伤模型,本构关系取自《混凝土结构设计规范》(GB50010—2002);钢梁和剪力钉采用理想弹性-硬化模型,屈服强度为 440 MPa,极限强度为 480 MPa。钢筋采用理想弹性模型,屈服强度为 335 MPa。

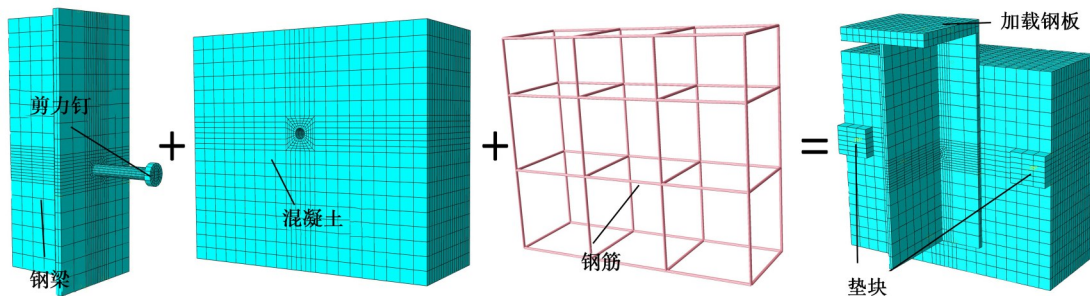


图 4 拉剪复合作用试件有限元模型

Fig. 4 FEM of specimen under tension and shear loading

3.2 模型验证

图 5 为试件破坏的应力云图。由图 5 可知,剪力钉下侧混凝土局部应力较大,与试验观测到混凝土被局部压碎现象一致。随着拉力施力比的增大,钉杆破坏时颈缩现象更加明显,表明剪力钉破坏兼具单轴受拉破坏和单轴受剪破坏特征。

图 6 为有限元模拟荷载-滑移曲线与实测荷载-滑移曲线对比图。由图 6 可知,荷载-滑移曲线均由弹性上升段和塑性段组成。在弹性上升阶段,荷载与滑移呈线性关系,此时剪力钉刚度较

大,荷载增大迅速,但滑移量增大较慢;在塑性阶段,荷载增大缓慢,但滑移量迅速增大。拉力施力比对剪力钉延性的影响并不明显。随着拉力施力比的增大,试件的弹性上升段范围逐渐缩小,弹性极限荷载不断下降,S₁、PS₁、PS₂ 和 PS₃ 试件的弹性极限荷载与峰值荷载比值分别为 0.45、0.40、0.37 和 0.29,表明在拉力施力比较大时,相比于单轴受剪状态,剪力钉会更快地发生塑性变形,设计时应予以关注。有限元计算模型得到的荷载-滑移曲线与实测曲线吻合度较高,计算抗剪承

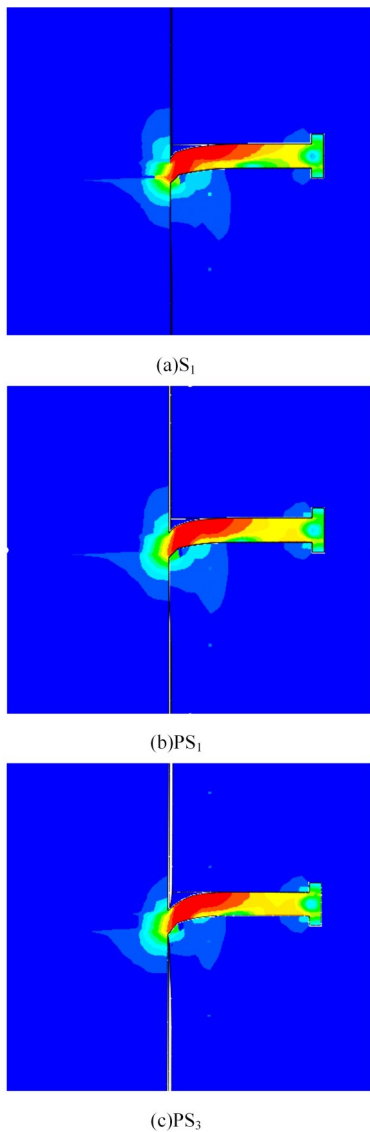


图 5 应力云图
Fig. 5 Stress diagram

载力与实测值最大误差约为 6%。因此,建立的有限元模型能够很好地模拟模型试验。

3.3 影响因素分析

3.3.1 混凝土强度

以剪力钉尺寸 $19 \times 100 \text{ mm}$ 为例,不同混凝土强度对剪力钉承载能力的影响如图 7 所示。由图 7(a)可知,提高混凝土强度可以增大剪力钉抗剪承载力。由图 7(b)可知,混凝土强度和拉力施力比对抗剪承载力的影响具有相关性。对于 C70 混凝土, $\lambda=0.2, 0.3, 0.4$ 和 0.5 时, V/V_0 分别为 $0.96, 0.92, 0.87$ 和 0.79 ; 对于 C40 混凝土, $\lambda=0.2, 0.3, 0.4$ 和 0.5 时, V/V_0 分别为 $0.94, 0.87, 0.79$ 和 0.71 。这说明降低混凝土强度会加剧拉力施力对抗剪承载力的折减作用。以桥梁工程中常用的

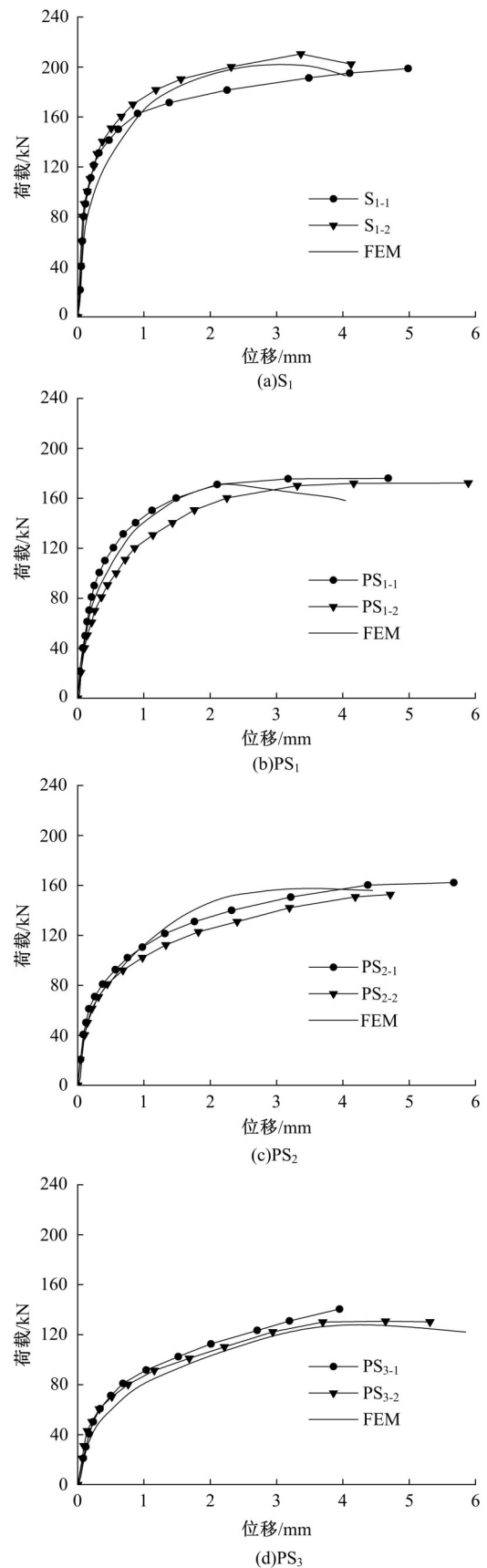


图 6 FEM 与试验荷载-滑移曲线对比
Fig. 6 Comparison of FEM and experimental load-slip curves

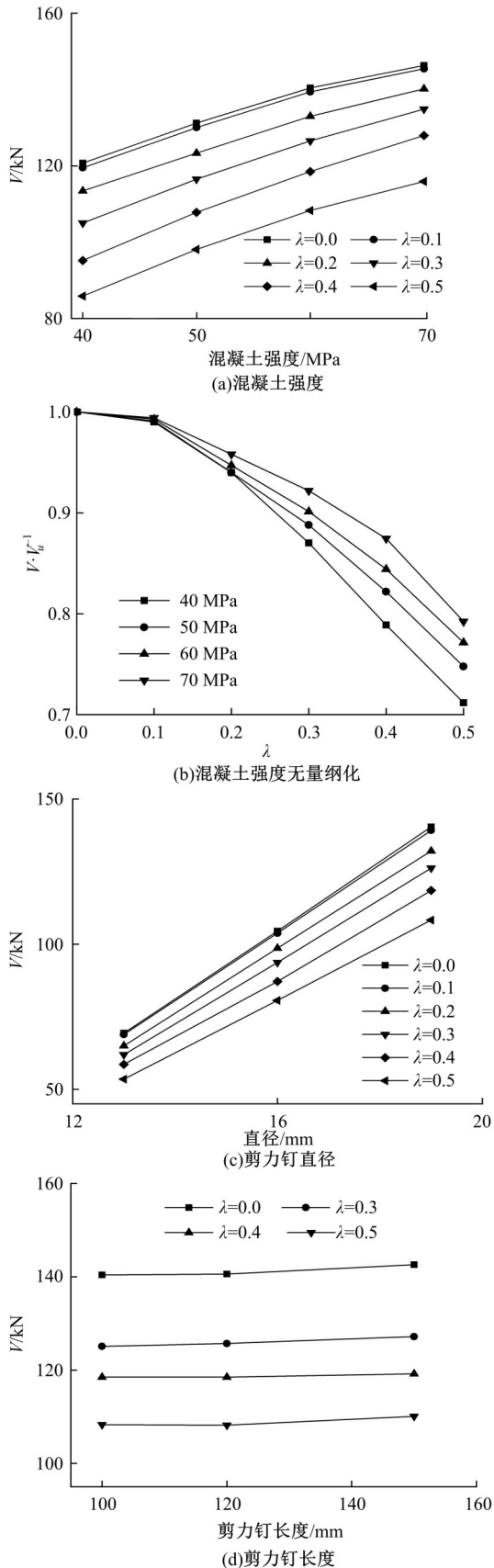


图 7 抗剪承载力影响因素

Fig. 7 Influence factors of ultimate shear capacity

C60混凝土为基准强度,考虑混凝土强度拉力施力比对剪力钉抗剪承载力的共同影响,总结出混凝土强度和 λ 共同作用影响系数 β ,如表3所示。

表 3 混凝土影响系数 β

Table 3 Concrete influence coefficient β

混凝土强度/MPa	λ				
	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
30	0.95	0.94	0.93	0.92	0.90
40	0.96	0.95	0.94	0.93	0.91
50	0.98	0.97	0.95	0.94	0.93
60	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98

3.3.2 剪力钉尺寸

以混凝土强度 60 MPa 为例,剪力钉尺寸对抗剪承载力的影响如图 7(c)(d)所示。由图 7(c)(d)可知,不同 λ 作用下,抗剪承载力随剪力钉直径的增大近似线性增大,剪力钉长度对抗剪承载力影响不大。

4 拉剪复合荷载作用下剪力钉连接件实用计算方法

4.1 荷载-滑移关系式

由 2.2 节和 3.2 节分析可知,相对于单轴剪切,拉剪复合荷载作用下,剪力钉的剪切刚度以及 V_c/V_u 均有明显下降。以往研究提出的荷载-滑移关系中,分数形式^[20]和指数形式^[21]具有较高的认可度,分别如下所示:

$$\frac{V}{V_u} = \frac{4.42(s - 0.031)}{1 + 4.24(s - 0.031)} \quad (2)$$

$$\frac{V}{V_u} = (1 - e^{-0.61s})^{0.34} \quad (3)$$

式中: s 为滑移值。

为了得到能够考虑拉力影响的荷载-滑移曲线计算公式,通过对文献[10]、文献[19]、本文试验数据和有限元结果进行拟合回归,结合欧洲标准对延性连接件规定特征滑移量大于 6 mm 的要求^[17,21],本文提出了考虑拉力影响的剪力钉连接件荷载-滑移关系式如下所示:

$$\frac{V}{V_u} = \frac{2s}{A + Bs} \quad (4)$$

式中: A 和 B 均为计算参数, $A=0.401+0.143\lambda+2.534\lambda^2$, $B=1.940-0.135\lambda-0.217\lambda^2$ 。

为了验证式(4)的适用性,对通过式(2)(3)(4)计算的荷载-滑移曲线与相关文献的试验值进

行了对比,结果如图 8 所示。由图 8 可知,各个关系式的计算曲线与试验曲线形状相似。常规关系式(2)(3)不能反映拉力荷载对荷载-滑移曲线的影响。相比之下,式(4)能够反映拉力对剪切刚度和 V_c/V 的折减作用,与相关文献试验结果吻合更好,计算曲线更合理。

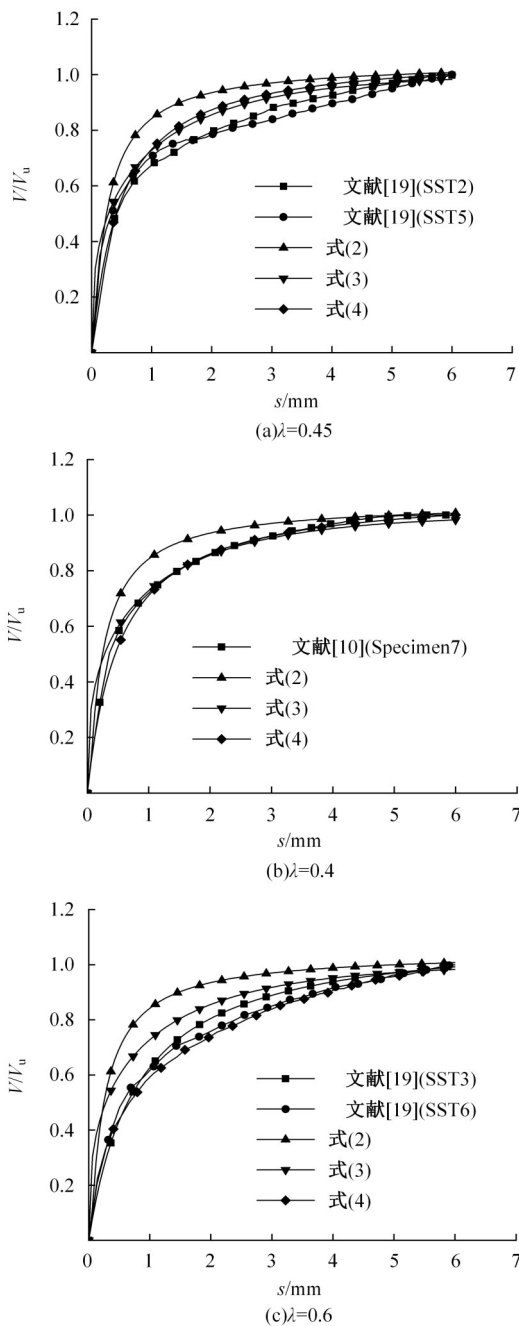


图 8 试验结果和计算曲线对比
Fig. 8 Comparison between text results and calculation curves

4.2 抗剪承载力计算方法

由 3.4 节分析可知,对承载力起到影响作用的因素包括混凝土强度、剪力钉直径,以及拉力施

力比。我国规范《钢-混凝土组合桥梁设计规范》(GB50917-2013)中给出了单钉承载力的计算公式:

$$V_u = 1.19A_s f_u \left(\frac{E_c}{E_s} \right)^{0.2} \left(\frac{f_c}{f_u} \right)^{0.1} \quad (5)$$

式中: A_s 为钉杆截面积; E_c 、 E_s 分别为混凝土和剪力钉的弹性模量; f_c 为混凝土抗压强度; f_u 为剪力钉抗拉强度。

表 4 为相关研究^[14,19,22,23]提出的剪力钉拉剪共同作用相关关系式。该类关系式表达式不直观,无法直接应用于工程设计和计算,且没有考虑混凝土强度和拉力施力比的共同影响。

表 4 剪力钉连接件拉剪相关关系式
Table 4 Shear and tension interaction relations of shear stud connectors

文献来源	拉剪相关关系式	公式编号
文献[14]	$\left(\frac{V}{V_u} \right)^{\frac{5}{3}} + \left(\frac{T}{T_u} \right)^{\frac{5}{3}} \leq 1$ $V = V_u, T \leq 0.1T_u$	(6)
文献[19]	$\left(\frac{V}{V_u} + 0.5 \right)^2 + \left(\frac{T}{T_u} + 0.5 \right)^2 \leq 2.61,$ $T > 0.1T_u$	(7)
文献[22]	$\left(\frac{V}{V_u} \right)^2 + \left(\frac{T}{T_u} \right)^2 \leq 1$ $V = V_u, T \leq 0.2T_u$	(8)
文献[23]	$\left(\frac{V}{V_u} \right) + \left(\frac{T}{T_u} \right) \leq 1.2, T > 0.2T_u$	(9)

在式(5)基础上,结合本文和其他文献^[10,11,13]共 19 组试验和 56 组有限元数据进行拟合回归,本文提出了拉剪复合荷载作用下剪力钉连接件的抗剪承载力计算公式为:

$$\begin{cases} V = 2.6\beta A_s f_u \left(\frac{E_c}{E_s} \right)^{0.3} \left(\frac{f_c}{f_u} \right)^{0.2} (1 - \lambda^{1.45})^{\frac{1}{1.45}} \\ \lambda = \frac{T}{0.75A_s f_u} \end{cases} \quad (10)$$

式中: β 按表 3 取值; λ 的计算参照文献[24]。

为了验证式(10)的适用性,将式(6)~(9)与相关文献中的试验值进行对比,结果如表 5 所示。由表 5 可知,式(6)(7)(9)的计算值偏大,公式设计偏不安全;式(8)的计算值过于保守,且离散性较大;本文提出的式(10)可以考虑混凝土强度和拉力施力比的共同影响,计算值略低于试验值,具备一定的安全储备,且离散性较小,与文献试验值吻合度较高,具有良好的工程适用性。

表5 剪力钉连接件抗剪承载力计算结果统计特征值比较

Table 5 Comparison of statistical eigenvalues of ultimate shear capacity calculation results of shear stud connectors

数据来源	试件/有限元数量	式(6)		式(7)		式(8)		式(9)		式(10)	
		μ	η	μ	η	μ	η	μ	η	μ	η
文献[10]	1	0.909	0.000	0.848	0.000	1.376	0.000	0.938	0.000	1.050	0.000
文献[11]	12	0.917	0.032	0.862	0.074	1.274	0.274	0.941	0.014	0.983	0.021
文献[13]	32	0.840	0.054	0.740	0.054	1.608	0.054	0.887	0.054	1.021	0.051
本文	30	1.007	0.046	0.926	0.028	1.620	0.107	1.044	0.009	1.101	0.022

注: μ 为试验值/计算值的平均值; η 为试验值/计算值的离散系数。

5 结 论

(1)拉剪共同荷载作用下,剪力钉的弹性剪切性能和抗剪承载力均明显下降。当拉力施力比从0增大到0.6时,弹性剪切刚度下降了69%,弹性极限荷载与抗剪承载力的比值从0.55下降至0.24,表明剪力钉会更快、更早地进入塑性变形阶段;抗剪承载力下降了31%。

(2)混凝土强度和拉力施力比对剪力钉连接件的抗剪承载力的影响具有相关性,降低混凝土强度会加剧拉力施力比对抗剪承载力的折减作用。对于C70混凝土, $\lambda=0.5$ 时, $V/V_u=0.79$;对于C40混凝土, $\lambda=0.5$ 时, $V/V_u=0.71$ 。剪力钉直径与抗剪承载力呈线性正相关关系;剪力钉长度对抗剪承载力基本没有影响。

(3)本文提出的拉剪共同作用下的剪力钉连接件荷载-滑移关系式和实用抗剪承载力计算式,比以往研究成果更加直观,且能够反映混凝土强度和拉力施力比的共同影响作用,与相关试验数据吻合度更高、离散度更小,计算结果偏安全,可应用于工程设计和计算。

参考文献:

- [1] 王倩,刘玉擎. 焊钉连接件抗剪承载力试验研究[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2013, 41(5): 659-663.
Wang Qian, Liu Yu-qing. Experimental study of shear stud connectors[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2013, 41(5): 659-663.
- [2] 匡亚川,陈立斌,李超举,等. 栓钉剪力连接件力学性能分析[J]. 吉林大学学报:工学版, 2023, 53(2): 538-546.
Kuang Ya-chuan, Chen Li-bin, Li Chao-ju, et al. Analysis of mechanical properties of stud shear connectors[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(2): 538-546.
- [3] 鞠晓臣,赵欣欣,刘晓光,等. 火灾作用下剪力钉抗拔性能研究[J]. 桥梁建设, 2018, 48(2): 55-60.
Ju Xiao-chen, Zhao Xin-xin, Liu Xiao-guang, et al. Study of pullout performance of shear stud under fire [J]. Bridge Construction, 2018, 48(2): 55-60.
- [4] 蔺钊飞,刘玉擎. 焊钉连接件抗拉承载力试验[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2015, 43(9): 1313-1319, 1331.
Lin Zhao-fei, Liu Yu-qing. Experimental study on static behavior of headed studs under tension force[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2015, 43(9): 1313-1319, 1331.
- [5] Luis P, Jerome F. Headed steel stud anchors in composite structures, part II: tension and interaction[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(2): 213-228.
- [6] 薛东焱,宛青云,潘志宏,等. 剪力与拉拔力共同作用下焊钉受力性能分析[J]. 江苏科技大学学报:自然科学版, 2020, 34(2): 97-102.
Xue Dong-yan, Wan Qing-yun, Pan Zhi-hong, et al. Mechanical behavior analysis of headed studs under shear and tension loads[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 34(2): 97-102.
- [7] 刘沐宇,赖苑林,邓晓光,等. 集束式长短剪力钉抗剪承载力计算方法[J]. 中国公路学报, 2018, 31(12): 97-105.
Liu Mu-yu, Lai Yuan-lin, Deng Xiao-guang, et al. Calculation method of shear capacity of clustered stud connectors with different lengths and diameters[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(12): 97-105.
- [8] 张阳,吴洁,邵旭东,等. 超高性能混凝土-普通混凝土界面抗剪性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(7): 81-89.
Zhang Yang, Wu Jie, Shao Xu-dong, et al. Experiment on interfacial shear properties between ultra-high performance concrete and normal strength concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(7): 81-89.

- [9] Shen M H, Chung K F. An investigation into shear resistances of headed shear studs in solid concrete slabs with local aggregates in Hong Kong[J]. *Procedia Engineering*, 2011: 1098-1105.
- [10] Saari W K, Hajjar J F, Schultz A E, et al. Behavior of shear studs in steel frames with reinforced concrete infill walls[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2004, 60(10): 1453-1480.
- [11] 蔺钊飞, 刘玉擎. 焊钉连接件拉剪相关关系模型试验[J]. *中国公路学报*, 2015, 28(1): 80-86.
Lin Zhao-fei, Liu Yu-qing. Model experiment on shear-tension interaction relationship of headed studs [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 28(1): 80-86.
- [12] Shen M H, Chung K F. Experimental investigation into stud shear connections under combined shear and tension forces[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2017, 133(6): 434-447.
- [13] Mirza O, Uy B. Effects of the combination of axial and shear loading on the behavior of headed stud steel anchors[J]. *Engineering Structures*, 2010, 32(1): 93-105.
- [14] McMackin P J, Slutter R G, Fisher J W. Headed steel anchor under combined loading[J]. *AISC Engineering Journal*, 1973, 2: 43-52.
- [15] 蒲黔辉, 谢宏伟, 樊书文, 等. 拔出破坏的钢混组合结构栓钉连接件承载力的分析方法[J]. *工程科学与技术*, 2019, 51(1): 89-95.
Pu Qian-hui, Xie Hong-wei, Fan Shu-wen, et al. Analysis method of bearing capacity of stud connector in steel concrete composite structures under push-out failure[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, 51(1): 89-95.
- [16] Luis P, Jerome F. Headed steel stud anchors in composite structures, part I: shear[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2010, 66(2): 198-212.
- [17] EN 1994-1-1:2004. Eurocode4: design of composite structures, part 1-1: general rules and rules for buildings[S].
- [18] Han Q H, Wang Y H, Xu J, et al. Static behavior of stud shear connectors in elastic concrete-steel composite beams[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2015, 113: 115-126.
- [19] Lin Z F, Liu Y Q, He J. Behavior of stud connectors under combined shear and tension loads[J]. *Engineering Structures*, 2014, 81: 362-376.
- [20] Xue D Y, Liu Y Q, Yu Z, et al. Static behavior of multi-stud shear connectors for steel-concrete composite bridge[J]. *Steel Construction*, 2012, 74(8): 1-7.
- [21] 苏庆田, 韩旭, 任飞. 多排焊钉推出试验试件力学性能[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2014, 42(7): 1011-1016.
Su Qing-tian, Han Xu, Ren Fei. Static behavior of push-out specimen with multi-row stud connectors [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science Edition)*, 2014, 42(7): 1011-1016.
- [22] Katsuhiko T, Katsuyuki N, Sumio H. Shear strength of headed stud shear connector subjected to tensile load[J]. *Journal of Constructional Steel*, 1999, 7: 233-240.
- [23] Bode H, Hanenkamp W. Capacity of headed studs under tension load[J]. *Bauingenieur*, 1985, 60: 361-367.
- [24] 安然, 王有志, 周磊, 等. 剪力钉连接件拉剪复合作用试验及计算模型[J]. *长安大学学报: 自然科学版*, 2020, 40(3): 42-52.
An Ran, Wang You-zhi, Zhou Lei, et al. Experiment and mechanical model of sheer stud connectors under combined tension and shear force[J]. *Journal of chang'an University (Natural Science Edition)*, 2020, 40(3): 42-52.