

文章编号:1673-2049(2018)01-0119-08

## 施工误差对剪力钉工作性能的影响

封博文<sup>1</sup>, 刘永健<sup>1</sup>, 彭元诚<sup>2</sup>, 孙立鹏<sup>1</sup>, 刘江<sup>1</sup>, 张凯<sup>3</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 中交第二公路勘察设计研究院, 湖北 武汉 430056;  
3. 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100088)

**摘要:**为了研究施工误差对剪力钉工作性能的影响,通过3个无误差剪力钉推出试验,探究剪力钉抗剪力学性能,并根据试验结果验证有限元模拟方法的准确性。在此基础上,考虑施工过程中可能发生的混凝土浇筑不密实、剪力钉布置边距不足、剪力钉倾斜3种施工误差,通过有限元模拟计算分析得到在各施工误差影响下剪力钉抗剪承载力及破坏模式。结果表明:无误差试件剪力钉破坏模式均为剪力钉根部剪断破坏,抗剪承载力试验值均大于各规范计算值;有限元分析得到剪力钉附近混凝土浇筑不密实可使剪力钉抗剪承载力降低60%~70%;剪力钉至混凝土边缘距离不满足规范要求可使剪力钉抗剪承载力降低27%;剪力钉倾斜可使剪力钉抗剪承载力降低41%;混凝土浇筑不密实对剪力钉抗剪承载能力影响最大。

**关键词:**桥梁工程;剪力钉;施工误差;推出试验;抗剪承载力

**中图分类号:**U441.4 **文献标志码:**A

## Influence of Construction Error on Working Performance of Shear Stud

FENG Bo-wen<sup>1</sup>, LIU Yong-jian<sup>1</sup>, PENG Yuan-cheng<sup>2</sup>, SUN Li-peng<sup>1</sup>, LIU Jiang<sup>1</sup>, ZHANG Kai<sup>3</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. CCCC Second Highway Consultants Co. Ltd, Wuhan 430056, Hubei, China; 3. CCCC Highway Consultants Co., Ltd., Beijing 100088, China)

**Abstract:** In order to study the influence of construction error on working performance of shear studs, through push-out test on three shear stud specimens without error to explore the shear mechanical properties of shear stud, meanwhile, according to the test results, the accuracy of the finite element method was proved. On this basic, considering the non-compactness concrete pouring, insufficient margin of shear stud layout and incline of shear stud in process of construction, and through the finite element simulation and analysis, shear capacity and failure modes of the shear stud under construction error were gained. The results indicate that the failure modes of shear studs without error are all shear failure in the shear stud root, the test values of shear capacity are greater than the calculated values of specifications. The finite element analysis results show that non-compactness concrete pouring near shear stud decreases shear bearing capacity by 60%-70%, insufficient margin of shear stud layout without meeting specifications decreases shear bearing capacity by 27%, and incline of shear stud decreases shear bearing capacity by 41%. The non-compactness concrete pouring is the greatest influence on the shear capacity of shear stud.

收稿日期:2017-11-26

基金项目:交通运输部建设科技项目(2014 318 363 230);陕西省交通运输厅科研项目(15-24K,16-29K)

作者简介:封博文(1992-),男,甘肃庆阳人,工学硕士研究生,E-mail:411896213@qq.com。

通讯作者:刘永健(1966-),男,江西玉山人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:lyj\_chd@gmail.com。

**Key words:** bridge engineering; shear stud; construction error; push-out test; shear bearing capacity

## 0 引言

钢-混凝土组合梁具有优异的力学性能和施工性能,因而被广泛应用于桥梁结构,如已建成的上海南浦大桥、青州闽江大桥及青海海黄大桥等。剪力钉为钢和混凝土的连接构件,具有传递界面剪力、限制界面滑移、防止混凝土掀起、保证钢和混凝土共同受力、协调变形的作用,其工作状态直接影响结构的工作性能。组合梁中剪力钉连接件的布置通常比较密集,在施工过程中经常会出现剪力钉附近混凝土浇筑不密实、剪力钉距钢板或混凝土边缘距离不满足规范要求以及剪力钉倾斜等施工问题。这些施工问题将改变剪力钉的合理工作状态,进而影响组合梁工作性能的充分发挥。

在国外,Ollgaard 等<sup>[1]</sup>根据剪力钉推出试验研究,提出采用指数型模型来描述剪力钉连接件推出试验的荷载-滑移曲线;Lam 等<sup>[2]</sup>采用有限元法模拟剪力钉推出试验,并与既有试验数据和规范数据进行对比,证实了有限元法的可靠性;Shim 等<sup>[3]</sup>针对大直径剪力钉进行推出试验研究,结果表明剪力钉抗剪刚度及抗剪承载力随直径增大而增大,欧洲规范<sup>[4]</sup>中建议的剪力钉抗剪承载力计算公式不适用于大直径剪力钉,并提出了大直径剪力钉抗剪承载力计算公式;An 等<sup>[5]</sup>针对普通混凝土和高强混凝土进行了剪力钉推出试验研究,结果表明混凝土的强度等级对剪力钉的抗剪承载力影响较大。

在中国,聂建国等<sup>[6]</sup>对剪力钉连接件在钢-高强混凝土组合梁中的性能进行了研究,提出了高强混凝土中连接件承载力的修正公式;薛伟辰等<sup>[7]</sup>采用推出试验研究了混凝土强度等级、栓钉直径以及钢梁类型等参数对剪力钉工作性能的影响,并根据试验结果提出了剪力钉抗剪承载力计算公式;贾艳东等<sup>[8]</sup>对钢-钢纤维混凝土组合梁的剪力钉连接件进行了推出试验研究,并根据试验结果给出了荷载-滑移曲线的拟合公式;丁发兴等<sup>[9]</sup>总结已有的推出试验数据,并结合有限元法研究了剪力钉直径、屈服强度、混凝土强度和横向配筋率对剪力钉荷载-滑移性能的影响,并提出了考虑剪力钉直径、屈服强度和混凝土强度影响的抗剪承载力计算公式和荷载-滑移关系计算方法;陈玲珠等<sup>[10-11]</sup>分别采用有限元法和剪力钉推出试验研究了剪力钉在高温下的工作性

能,并提出了高温下剪力钉抗剪承载力的计算公式;荣学亮等<sup>[12]</sup>通过标准试件的推出试验,研究了剪力钉连接件锈蚀后抗剪承载力、变形能力和疲劳寿命的变化规律。

目前,国内外针对剪力钉受力机理和工作性能的研究已相当丰富,但针对施工误差对剪力钉工作性能影响的研究还相对较少。本文首先采用剪力钉推出试验和有限元仿真分析相结合的研究方法,验证了采用有限元软件 ABAQUS 模拟剪力钉推出试验时建模参数选取的合理性与可靠性。以有限元分析为基础,研究了施工误差对剪力钉连接件工作性能的影响,为组合梁的设计和施工提供参考。

## 1 静载推出试验

### 1.1 试件设计

剪力钉推出试验采用 1 组共 3 个推出试件来研究剪力钉的抗剪承载力及其变形能力。试件构造见图 1,每个试件有 4 个剪力钉,其规格为  $\phi 22 \times 200$ ,材质选用 ML15,机械性能和焊接性能满足《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》(GB/T 10433—2002)的要求。钢板材料为 Q345D,混凝土标号为 C50。为排除推出试验时混凝土与钢界面黏结作用对剪力钉抗剪能力的干扰,在试件钢结构翼缘表面涂抹润滑油,防止钢翼缘与混凝土黏结。

### 1.2 加载方案及测点布置

采用 20 000 kN FCS 佛力加载系统进行加载,对工字钢翼缘施加推力。试件底部设置细砂垫层,保证混凝土底部的受力均匀。测点布置见图 2,位移计布置在左右混凝土块的 2 个侧面上,共 4 个,精度要求为 1/1 000 mm。

### 1.3 试验结果及分析

#### 1.3.1 破坏形态

本次试验剪力钉连接件的破坏形态如图 3 所示,试件均为剪力钉根部剪断破坏。大部分剪力钉断裂面光滑,且可以看到明显的剪切变形。剪力钉根部沿受力方向有小部分混凝土被压碎,混凝土块表面无裂缝。产生这种破坏形态的主要原因是混凝土强度较高且剪力钉直径较小。

#### 1.3.2 极限承载力分析

本次推出试验各试件破坏的极限荷载及对应钢

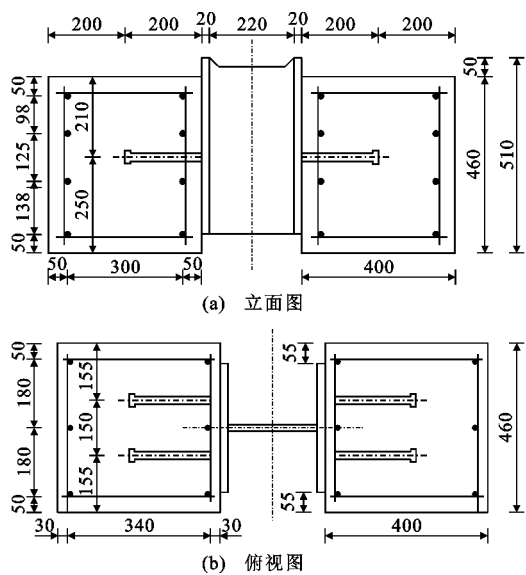


图 1 试件几何尺寸及构造(单位:mm)  
Fig. 1 Geometric Dimension and Construction of Specimen (Unit:mm)

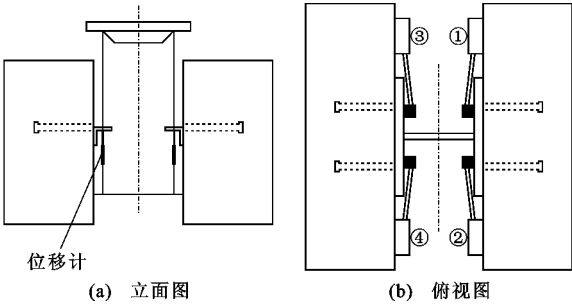


图 2 测点布置  
Fig. 2 Layout of Measuring Points

混界面的最大相对滑移值见表 1。由表 1 可知,3 个试件的极限荷载偏差范围为 4%~9%,根据文献 [13],剪力钉的极限承载力取 3 个试件的最小值 686.6 kN,换算成单钉抗剪承载力为 171.7 kN。表 2 列出了由各规范推荐公式计算所得的  $\phi 22 \times 200$  剪力钉的抗剪承载力。由表 2 可知,ASSHTO 规范计算值与试验值最接近,仅有 2.7% 的相对误差。其他各规范计算的抗剪承载力均比本次推出试验所得抗剪承载力小。

1.3.3 荷载-滑移曲线分析

本次试验得到的 3 个试件的荷载-滑移曲线见图 4。由图 4 可知,受荷初始阶段,荷载与相对滑移量为线性关系,剪力钉的抗剪刚度大,线性阶段最大滑移量约为 0.5 mm。当单钉所受荷载达到其抗剪承载力的 60%左右时,剪力钉受力状态开始进入塑性阶段,荷载与滑移量呈现明显的非线性关系,抗剪刚度逐渐减小。当荷载达到极限荷载的 70%~



(a) 钢板面上的断痕



(b) 混凝土面上的断痕



(c) 各焊钉破坏形态

图 3 剪力钉连接件破坏形态

Fig. 3 Failure Modes of Shear Stud Connectors

表 1 试件极限荷载及最大相对滑移

Tab. 1 Ultimate Loads and Maximum Relative Slips of Specimens

试件编号	SS-1	SS-2	SS-3	平均值
极限荷载/kN	700.5	686.6	792.3	726.5
单钉抗剪承载力/kN	175.1	171.7	198.1	181.6
最大相对滑移/mm	6.605	6.689	6.660	6.651

80%,滑移量达到 2 mm 时,滑移量迅速增长,而荷载无明显增加,直至达到极限荷载。试件破坏表现出明显的延性破坏特征。

2 有限元模拟

2.1 有限元模拟方法

本文采用大型通用有限元计算软件ABAQUS

表 2 抗剪承载力的规范计算值与试验值对比

Tab. 2 Contrast of Shear Capacity Between Standard Calculation Values and Test Values

规范	JTG/T D64-01—2015 <sup>[14]</sup>	欧洲规范 <sup>[4]</sup>	AASHTO 1998 <sup>[15]</sup>	BS 5400 <sup>[16]</sup>	本文试验
抗剪承载力/kN	138.1	118.7	167.1	153.0	171.7
计算值与试验值的相对误差/%	19.6	30.9	2.7	10.9	

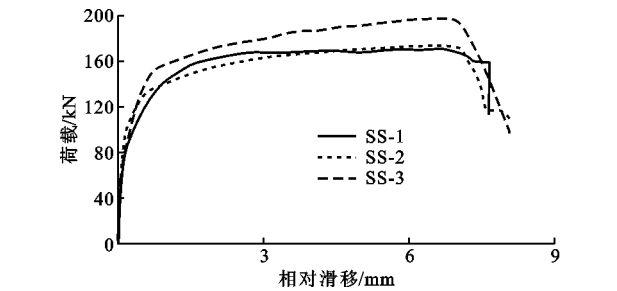


图 4 推出试件荷载-滑移曲线

Fig. 4 Load-slip Curves of Push-over Specimens

进行建模。所有试件均采用 C3D8R 实体单元进行模拟,根据对称性取 1/2 试件进行建模计算。网格划分采用扫掠技术及中性轴算法,单元均为六面体。为使计算结果更精确,增加了剪力钉的网格密度。有限元模型及网格划分见图 5。

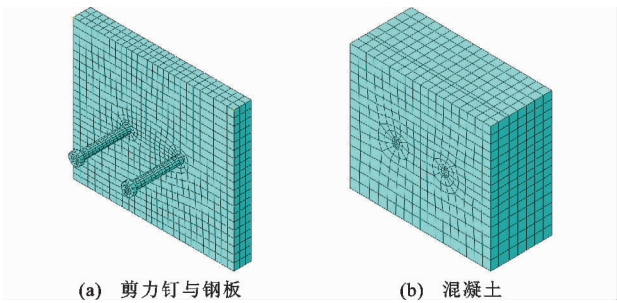


图 5 有限元模型及网格划分

Fig. 5 Finite Element Model and Meshing

混凝土的本构模型采用损伤塑性模型,损伤因子根据文献<sup>[17]</sup>提出的方法计算。采用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[18]</sup>中混凝土单轴抗压应力-应变( $\sigma-\epsilon$ )曲线,混凝土强度等级为 C50。剪力钉及钢板的本构模型采用如图 6 所示的理想弹塑性模型,其中,屈服强度  $f_y$  取 345 MPa,  $\epsilon_y$  为屈服应变,  $E_s$  为钢材弹性模量。

由于对试验试件组合界面进行了涂油处理,无界面切向摩擦,因此,有限元建模时忽略了钢板与混凝土交界面的切向摩擦。采用位移加载模拟实际加载过程。

2.2 与推出试验结果对比分析

有限元模拟计算所得的荷载-滑移曲线与推出试验所得的荷载-滑移曲线对比见图 7。由图 7 可知,有限元计算所得的荷载-滑移曲线变化规律与推

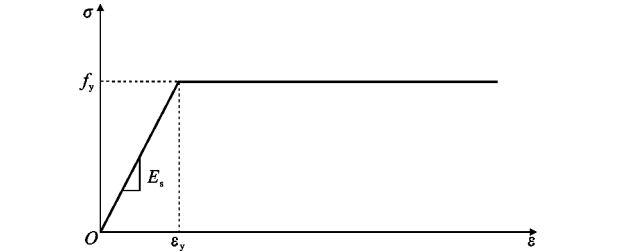


图 6 钢材本构关系

Fig. 6 Constitutive Relation of Steel

出试验基本吻合。二者所得出的剪力钉在弹性阶段的抗剪刚度基本一致。有限元模拟计算所得剪力钉抗剪承载力为 170.0 kN,比推出试验结果仅小 1%。

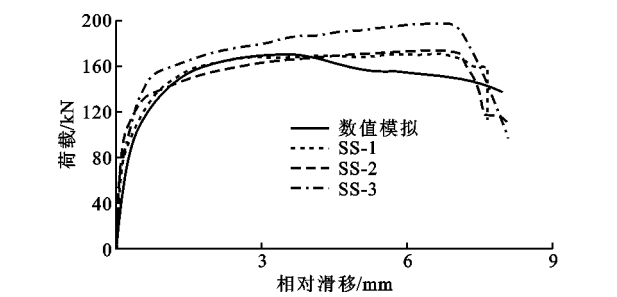


图 7 荷载-滑移曲线对比

Fig. 7 Comparison of Load-slip Curves

有限元模拟与剪力钉推出试验所得的弹性极限荷载、破坏荷载、荷载-滑移曲线发展规律均较为接近。因此,可采用第 2.1 节所述的方法建立有限元模型,从而对剪力钉力学性能开展研究。

3 施工误差的影响

3.1 混凝土浇筑不密实

组合梁的钢与混凝土连接部位构造比较复杂,剪力钉布置多而密,且受普通钢筋对空间的影响,剪力钉附近的混凝土浇筑质量难以保证,经常会出现混凝土浇筑不密实的情况,导致混凝土强度降低,从而影响剪力钉的工作性能。

通过 ABAQUS 有限元软件模拟考虑剪力钉附近混凝土浇筑不密实对剪力钉受力性能的影响分 3 种情况考虑:①剪力钉根部混凝土不密实;②剪力钉周围混凝土均不密实;③剪力钉一侧混凝土不密实。计算取最不利情况,即认为浇筑不密实部分混凝土强度为 0,模拟时钝化对应位置混凝土单元,图 8 为

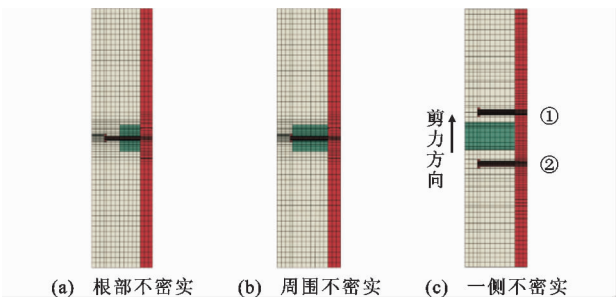


图 8 考虑局部混凝土不密实的有限元模型

Fig. 8 Finite Element Model Considering Local Concrete Non-compactness

对应的有限元模型。

图 9 为有限元计算所得的试件破坏形态。对于情况①,②,试件破坏的标志均为剪力钉根部屈服,钢板与混凝土相对滑移过大导致试件丧失承载力。试件发生此种破坏的主要原因是剪力钉周围缺少混凝土的约束作用,在弯剪共同作用下剪力钉根部很快屈服,产生较大的塑性变形,导致钢板与混凝土发生过大的相对滑移。对于情况③,沿图 8 剪切方向 1 号剪力钉后侧有效混凝土厚度较少,这部分混凝土受剪力钉挤压破坏失效。随后由 2 号剪力钉继续承载,最终受剪屈服破坏。

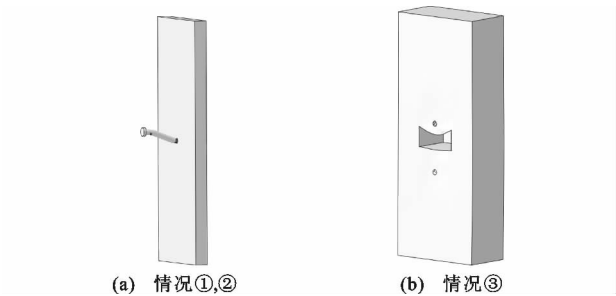


图 9 考虑局部混凝土不密实的破坏形态

Fig. 9 Failure Modes Considering Local Concrete Non-compactness

图 10 为考虑局部混凝土不密实的有限元计算结果与正常单个剪力钉推出试验的有限元计算结果对比。由图 10 可知,剪力钉附近混凝土浇筑不密实使剪力钉单钉抗剪承载力降低 60%~70%。

3.2 剪力钉布置边距不足

中国各规范对剪力钉距钢梁翼缘及混凝土边缘的最小距离都提出了要求,具体规定见表 3。实际工程中经常会出现剪力钉布置边距不满足规范要求的情况,本文考虑以下 3 种情况进行有限元建模:①剪力钉距混凝土边缘 50 mm;②剪力钉距混凝土边缘 75 mm;③剪力钉距混凝土边缘 100 mm。图 11 为相应的有限元模型。

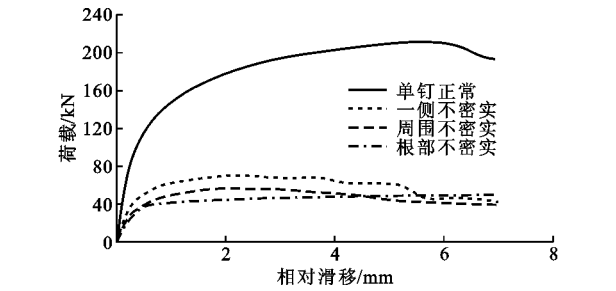


图 10 考虑局部混凝土不密实的荷载-滑移曲线

Fig. 10 Load-slip Curves Considering Local Concrete Non-compactness

表 3 中国规范对剪力钉边距的要求

Tab. 3 Requirements of Chinese Standards for Edge Distances of Shear Studs

规范	要求
GB 50017—2003 <sup>[19]</sup>	连接件的外侧边缘与钢梁翼缘之间的距离不应小于 20 mm;连接件外侧边缘至混凝土翼板边缘的距离不应小于 100 mm。
GB 50917—2013 <sup>[20]</sup>	连接件的外侧边缘与钢梁翼缘之间的距离不应小于 30 mm;连接件外侧边缘至混凝土桥面板边缘的距离不应小于 100 mm。
JTG/T D64-01—2015 <sup>[14]</sup>	焊钉连接件的外侧边缘与钢板边缘的距离不应小于 25 mm。

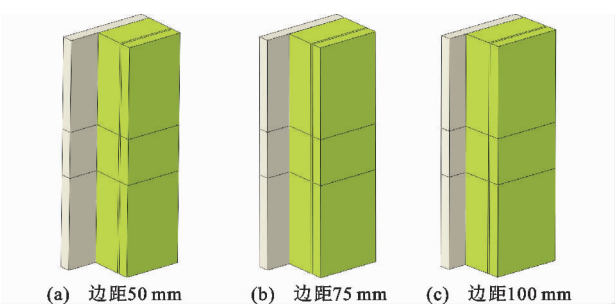


图 11 考虑边距不足的有限元模型

Fig. 11 Finite Element Models Considering Edge Distance Insufficient

剪力钉距混凝土边缘的距离分别为 50,75,100 mm 时,试件的破坏形态相似,均为剪力钉根部屈服、根部混凝土压碎破坏,且边距较小一侧的混凝土开裂并出现外鼓。图 12 为有限元计算所得的试件破坏形态。

图 13 为考虑边距不足的有限元计算结果与正常单个剪力钉推出试验有限元计算结果对比。由图 13 可知,剪力钉距混凝土边缘距离不满足规范要求导致单钉抗剪承载力降低约 27%,且边距越小承载力越低,但差别不明显。分析原因是由于剪力钉距



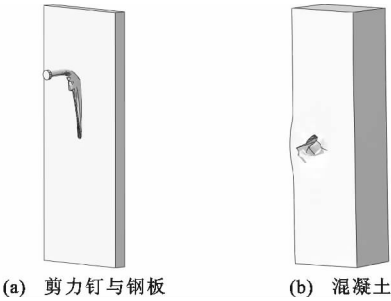


图 12 考虑边距不足的破坏形态

Fig. 12 Failure Modes Considering Edge Distance Insufficient

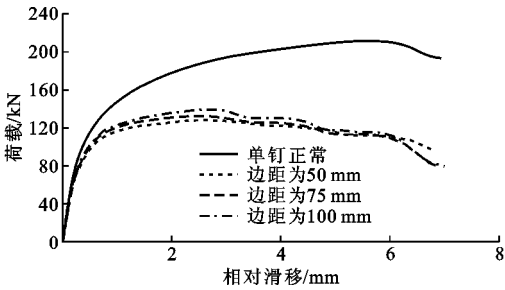


图 13 考虑边距不足的荷载-滑移曲线

Fig. 13 Load-slip Curves Considering Edge Distance Insufficient

混凝土边缘距离不足,降低了混凝土对剪力钉的约束作用,且距离越小,混凝土对剪力钉的约束作用越小,则剪力钉的抗剪承载力越小。

3.3 剪力钉倾斜

剪力钉在焊接过程中可能存在焊接偏差或施工过程中机具与人员操作过程的“磕碰”损坏,即导致剪力钉与钢板不垂直,存在偏角。图 14 为某组合梁桥在施工过程中出现的剪力钉倾斜情况。针对这种情况建立有限元模型,考察剪力钉倾斜对其承载力的影响。有限元模拟考虑顺偏斜方向加载(顺推)和逆偏斜方向加载(逆推)2 种受力情况,剪力钉倾斜角度选取  $10^{\circ}$ 、 $30^{\circ}$ 、 $50^{\circ}$ 。图 15 为相应的有限元模型。

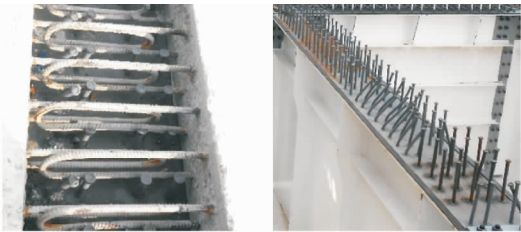


图 14 剪力钉倾斜

Fig. 14 Shear Stud Inclination

根据有限元计算结果,所有试件顺推时及剪力钉倾斜  $10^{\circ}$  的试件逆推时,试件的破坏形态均为剪

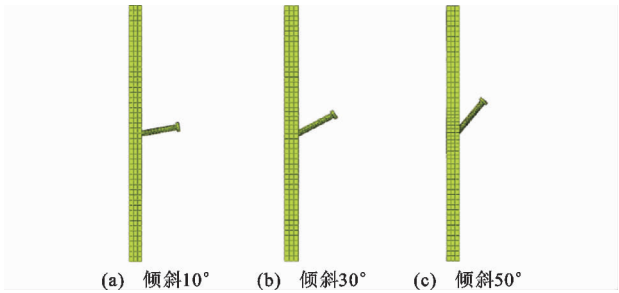


图 15 考虑剪力钉倾斜的有限元模型

Fig. 15 Finite Element Model Considering Shear Stud Inclination

力钉根部剪断破坏,剪力钉倾斜  $30^{\circ}$ 、 $50^{\circ}$  的试件逆推时,试件的破坏形态为剪力钉根部混凝土开裂破坏。图 16 为考虑剪力钉倾斜的有限元计算结果与正常单个剪力钉推出试验的有限元计算结果对比。由图 16 可以看出:顺推时,剪力钉倾斜使单钉抗剪承载

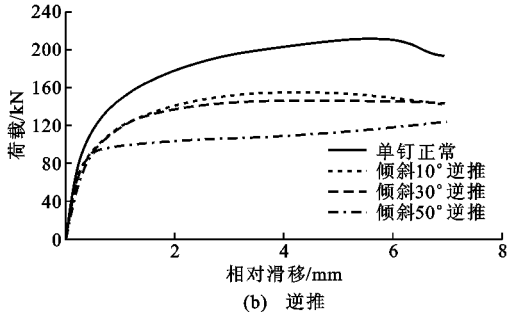
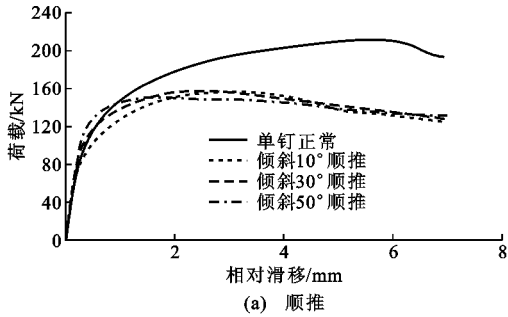


图 16 考虑剪力钉倾斜的荷载-滑移曲线

Fig. 16 Load-slip Curves Considering Shear Stud Inclination

力平均下降约 26%,3 种倾斜角度的单钉抗剪承载力较接近;逆推时,剪力钉抗剪承载力随剪力钉倾斜角度增大而降低,其中当倾斜角度为  $50^{\circ}$  时降低幅度较大,倾斜角度为  $10^{\circ}$ 、 $30^{\circ}$ 、 $50^{\circ}$  时,抗剪承载能力分别降低 26.8%,30.36%,41.3%。图 17 为逆推与顺推的抗剪承载力对比。由图 17 可以看出,剪力钉分别倾斜  $10^{\circ}$ 、 $30^{\circ}$ 、 $50^{\circ}$  时,逆推承载力比顺推承载力分别低 2%,7%,13%。剪力钉倾斜角度相同的情况下,逆推比顺推受力更为不利,且随着倾斜角度的增大,逆推承载力比顺推承载力降低更多。上述不同倾斜角度剪力钉破坏模式及抗剪承载能力计算

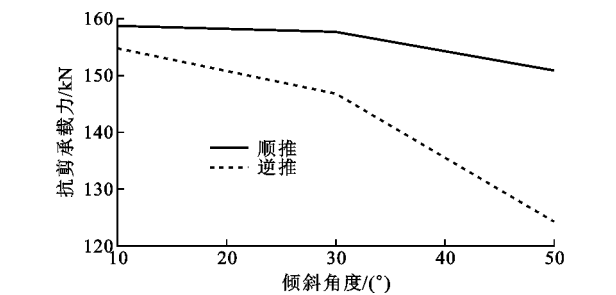


图 17 剪力钉逆推与顺推抗剪承载力对比

Fig. 17 Comparison of Shear Capacities of Shear Studs Between Push and Push Back

结果汇总于表 4。

表 4 剪力钉倾斜破坏形态及抗剪承载力

Tab. 4 Failure Modes and Shear Capacities of Shear Stud Inclination

加载方式	倾斜角度/(°)	破坏形态	抗剪承载力/kN	承载力降低幅度/%
顺推	10	剪力钉根部剪断破坏	158.8	25.0
	30	剪力钉根部剪断破坏	157.7	25.5
	50	剪力钉根部剪断破坏	150.9	28.7
逆推	10	剪力钉根部剪断破坏	154.8	26.8
	30	剪力钉根部混凝土开裂破坏	146.8	30.6
	50	剪力钉根部混凝土开裂破坏	124.3	41.3

## 4 结 语

(1) 本文通过对剪力钉推出试验结果与采用 ABAQUS 有限元分析计算结果进行对比,验证了本文有限元模拟方法的合理性与可靠性。可采用数值模拟的方法对剪力钉受力性能开展研究。

(2) 各国规范计算所得的剪力钉抗剪承载力偏于保守,均小于剪力钉推出试验和有限元仿真计算得到的剪力钉抗剪承载力。

(3) 由于剪力钉周围混凝土浇筑不密实、剪力钉布置边距不足和剪力钉倾斜 3 种施工误差的存在,使剪力钉的抗剪承载力有所降低,其中混凝土浇筑不密实的影响最大。因此,在施工过程中应严格控制施工质量,减小施工误差,从而保证剪力钉的工作性能。

### 参考文献:

### References:

[ 1 ] OLLGAARD J G, SLUTTER R G, FISHER J W. Shear Strength of Stud Connectors in Lightweight and Normal-weight Concrete[J]. AISC Engineering Journal, 1971, 8(2): 55-64.

[ 2 ] LAM D, EL-LOBODY E. Behavior of Headed Stud

Shear Connectors in Composite Beam[J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(1): 96-107.

[ 3 ] SHIM C S, LEE P G, YOON T Y. Static Behavior of Large Stud Shear Connectors[J]. Engineering Structures, 2004, 26(12): 1853-1860.

[ 4 ] ENV 1994-2-2001, Eurocode 4. Design of Composite Steel and Concrete Structures — Part 2: Composite Bridges[S].

[ 5 ] AN L, CEDERWALL K. Push-out Tests on Studs in High Strength and Normal Strength Concrete[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1996, 36(1): 15-29.

[ 6 ] 聂建国, 谭 英, 王洪全. 钢-高强混凝土组合梁栓钉剪力连接件的设计计算[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1999, 39(12): 94-97.

NIE Jian-guo, TAN Ying, WANG Hong-quan. Strength of Stud Shear Connectors in Composite Steel-HC Beams[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 1999, 39(12): 94-97.

[ 7 ] 薛伟辰, 丁 敏, 王 骅, 等. 单调荷载下栓钉连接件受剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(1): 95-100.

XUE Wei-chen, DING Min, WANG Hua, et al. Experimental Studies on Behavior of Stud Shear Connectors Under Monotonic Loads[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(1): 95-100.

[ 8 ] 贾艳东, 刘玉臣, 孙志屏, 等. 钢与钢纤维混凝土组合梁栓钉连接件的性能试验[J]. 兰州理工大学学报, 2008, 34(4): 141-144.

JIA Yan-dong, LIU Yu-chen, SUN Zhi-ping, et al. Performance Experiment on Stud Connectors of Steel and Steel-fiber Concrete Composite Beams[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2008, 34(4): 141-144.

[ 9 ] 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 Fa-xing, NI Ming, GONG Yong-zhi, 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.

[10] 陈玲珠, 蒋首超, 李国强. 高温下栓钉剪力连接件的结构性能数值模拟研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 32(1): 77-83.

CHEN Ling-zhu, JIANG Shou-chao, LI Guo-qiang. Numerical Simulation of Structural Behavior of Stud Shear Connectors at Elevated Temperature[J]. Jour-

nal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2012,32(1):77-83.

[11] 陈玲珠,李国强,蒋首超,等. 高温下栓钉剪力连接件抗剪性能试验[J]. 同济大学学报:自然科学版,2013,41(8):1151-1157.  
CHEN Ling-zhu, LI Guo-qiang, JIANG Shou-chao, et al. Experimental Studies on Behavior of Headed Stud Shear Connectors at Elevated Temperatures[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2013, 41(8):1151-1157.

[12] 荣学亮,黄 侨,任 远. 栓钉连接件锈蚀后静力性能和抗疲劳性能的试验研究[J]. 土木工程学报,2013,46(2):10-18.  
RONG Xue-liang, HUANG Qiao, REN Yuan. Experimental Study on Static and Fatigue Behaviors of Stud Connectors for Composite Beams After Corrosion [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(2):10-18.

[13] 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,2005.  
NIE Jian-guo, LIU Ming, YE Lie-ping. Steel-concrete Composite Structure[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.

[14] JTG/T D64-01—2015,公路钢混组合桥梁设计与施工规范[S].  
JTG/T D64-01—2015, Specifications for Design and Construction of Highway Steel-concrete Composite Bridge[S].

[15] AASHTO 1998, LRFD Bridge Design Specifications [S].

[16] BS 5400-10C-1980, Steel, Concrete and Composite Bridges. Part 10: Charts for Classification of Details for Fatigue[S].

[17] 曹 明. ABAQUS 损伤塑性模型损伤因子计算方法研究[J]. 交通标准化,2012(2):51-54.  
CAO Ming. Research on Damage Plastic Calculation Method of ABAQUS Concrete Damaged Plasticity Model[J]. Transport Standardization, 2012(2): 51-54.

[18] GB 50010—2010,混凝土结构设计规范[S].  
GB 50010—2010, Code for Design of Concrete Structures[S].

[19] GB 50017—2003,钢结构设计规范[S].  
GB 50017—2003, Code for Design of Steel Structures [S].

[20] GB 50917—2013,钢-混凝土组合桥梁设计规范[S].  
GB 50917—2013, Code for Design of Steel and Concrete Composite Bridge[S].