

多排组合剪力连接件承载力有限元分析

张成¹, 吴沛峰¹, 张艺淳², 张若瑜^{2,3}

[1.中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津市 300074; 2.天津大学建筑工程学院, 天津市 300072;
3.滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室(天津大学), 天津市 300072]

摘要:为研究多排组合剪力连接件栓钉直径、贯通钢筋直径、开孔孔径、开孔孔数对抗剪承载力和荷载-滑移曲线的影响,使用ABAQUS软件建立组合剪力连接件模型,通过与现有试验对比验证其可行性。在此基础上,建立多排组合剪力连接件模型进行参数分析,结果表明:增加开孔孔数、开孔直径、贯通钢筋直径、栓钉直径均可有效提高组合剪力连接件的抗剪承载力。其中,开孔孔数在4以下时,各孔之间不会互相影响,承载力随孔数线性增加;贯通钢筋直径在16 mm以下时,对组合剪力连接件的承载力影响较小,当直径从16 mm增加至20 mm时,构件承载力有明显提高;栓钉直径与承载能力之间并不是线性增加关系。依据叠加原理,建立了多排组合剪力连接件承载力计算公式,其计算值与数值计算结果吻合良好。

关键词:组合结构;多排组合剪力连接件;有限元模型;荷载-滑移曲线;抗剪承载力

中图分类号: TU398+.9

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2022)03-0201-04

0 引言

随着钢-混凝土组合梁结构在桥梁工程和高层建筑中的应用,能组合来共同受力的关键构件为剪力连接件,剪力键按其刚度和组合作用强弱可以分为刚性和柔性两种,目前使用最广泛的柔性连接件是栓钉剪力连接件,刚性连接件是PBL剪力连接件。国内外学者针对栓钉剪力键^[1-3]和PBL剪力键^[4-7]进行了广泛的研究,提出了受力分析模型和抗剪承载力计算公式。

单一剪力键连接形式在实际工程中会有缺点,栓钉剪力键在焊接时容易造成操作空间上的障碍,同时易产生疲劳问题,PBL剪力键由于刚性过大容易使混凝土发生脆性破坏,在传力方向上也受到限制^[8],为了改善剪力键的受力性能,将栓钉剪力键和PBL剪力键的优势结合,各国学者研发了多种新型组合剪力键形式。Zhang^[9]等通过在单个PBL剪力键两侧增加两排栓钉,并通过推出试验研究了此种新型组合连接件的承载能力,陈海等^[10]通过将栓钉焊在PBL剪力键开孔之间,增强了构件的抗剪承载力和抗掀起力,得出了组合剪力键兼具PBL剪力键和栓钉剪力键特征的结论。赵本露^[11]将PBL剪力键和栓钉剪力键在同一平面上交错放置,通过实验得出

将刚性剪力键和柔性剪力键组合可改善单一栓钉剪力键的界面滑移效应,使得混凝土得到充分利用。

目前关于抗剪连接件的研究工作主要集中在对栓钉连接件和PBL连接件单独作用下,以及单排组合连接件的研究,对于多排PBL和栓钉组合连接件的研究较为缺乏。多排PBL和栓钉组合连接件共同作用时,可能在传力机制、破坏形态、极限承载力方面与单排组合连接件不同,对多排组合连接件的抗剪性能进行深入研究很有必要。

1 有限元模型

1.1 建立有限元模型

为研究组合剪力键的抗剪机理与力学性能,本节采用通用有限元软件ABAQUS建立模型,基于文献[11]中的T-C构件,以PBL和栓钉组合抗剪为研究对象,将PBL剪力键和栓钉在同一平面上交错放置,贯通钢筋为直径12 mm的HPB400钢筋,使用Q235圆钢加工为直径16 mm、长度80 mm的栓钉,PBL剪力键是长度175 mm,宽度为80 mm,厚度为15 mm的开孔直径为40 mm的开孔钢板,T-C整体构件中由四个PBL剪力键,四个栓钉剪力键以及两个贯通钢筋作为主要受力构件,有限元模型主要分为五个部分:PBL剪力键,栓钉,H型钢,贯通钢筋,混凝土块。由于模型关于两个对称面对称,取1/4建立模型以减少计算时间,所有部分均采用C3D8R单元模拟,整体网格

收稿日期: 2021-05-25

作者简介: 张成(1990—),男,本科,工程师,从事桥梁结构设计工作。

尺寸取 20 mm,混凝土樁,贯通钢筋和栓钉部分处网格尺寸取 12 mm 以准确模拟受力情况,模型图如图 1 所示。

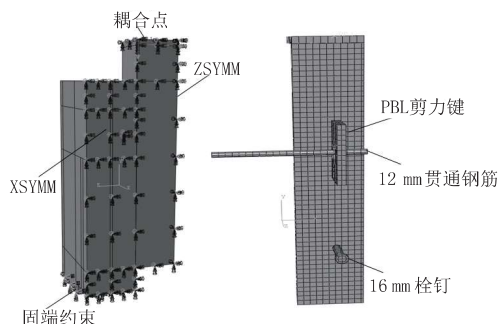


图 1 组合剪力键有限元模型图

混凝土采用塑性损伤模型,根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[12],计算 C50 混凝土材料的函数输入参数,H 型钢、PBL 剪力键和贯通钢筋的本构关系采用双直线模型,由于栓钉在弹性阶段之后仍具有较大强化作用,本构关系采用双斜线模型。

H 型钢翼缘与混凝土,混凝土与栓钉、PBL 剪力键之间采用表面与表面接触,切向采用罚函数模拟,摩擦系数取 0.25,法向采用硬接触,并允许接触分离,即不考虑钢与混凝土的界面粘结力;H 型钢与栓钉和 PBL 剪力键之间采用 Tie 接触模拟实际工程中的焊接连接;贯通钢筋在混凝土内以受剪为主,可以不考虑相对滑移,通过共节点方式连接。

将混凝土底部的自由度全部约束,加载端除竖向位移(U_2)外全部约束,在两个对称面分别施加对称约束,对参考点(RP1)进行位移加载。

1.2 验证有限元模型

为验证文章上述建立的有限元模型的准确性,与文献^[11]中的 T-C 试件的试验结果对比,荷载-滑移曲线对比如图 2 所示。可以看出两条曲线在极限承载力数值和抗剪刚度的变化上均可吻合。试验结果 T-C 构件极限承载力为 1 790.2 kN,数值计算得出的极限承载力为 1 698.1 kN,误差为 5.14%。通过以上对比可知,两者结果相近,表明使用此种建模方法模拟 PBL 剪力键和栓钉组合抗剪试验效果良好,可以继续开展多排组合剪力键的有限元分析。

2 参数化分析

由于目前缺乏多排组合剪力连接件的承载能力试验结果,有限元模拟结果可以为承载力计算公式提供依据。考虑贯通钢筋直径、PBL 剪力键开孔孔数和直径、栓钉直径的影响,对 10 个构件进行数值模拟分

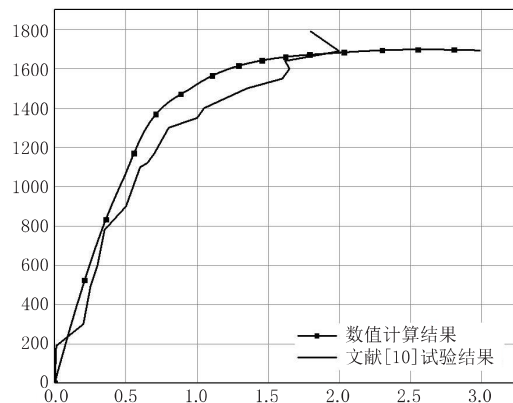


图 2 数值计算与文献[10]试验结果的荷载-滑移曲线对比
析,构件参数见表 1,有限元分析结果如图 3 所示。

表 1 构件尺寸参数

构件编号	排数	孔数 /个	开孔直径 /mm	贯通钢筋直径 /mm	栓钉直径 /mm
T-C-1	双排	1	50	12	10
T-C-2		2	50	12	10
T-C-3		3	50	12	10
T-C-4		4	50	12	10
T-C-5		1	40	12	10
T-C-6		1	30	12	10
T-C-7		1	50	16	10
T-C-8		1	50	20	10
T-C-9		1	50	12	13
T-C-10		1	50	12	16

构件 T-C-1—T-C-4 的荷载-位移曲线如图 3(a)所示,随着 PBL 剪力键开孔孔数的增加,试件承载能力明显增大,孔数在 4 以下时,各孔之间不会互相影响,承载力随孔数线性增加。构件 T-C-1, T-C-5, T-C-6 的荷载-位移曲线如图 3(b)所示,随着 PBL 剪力键开孔直径的增大,组合剪力连接件的承载力增加,且抗剪刚度增大。构件 T-C-1, T-C-7, T-C-8 的荷载-位移曲线如图 3(c)所示,贯通钢筋直径在 16 mm 以下时,其变化对极限承载力影响较小,当直径从 16 mm 增加至 20 mm 时,构件承载力有明显提高,说明贯通钢筋直径在和混凝土樁的直径协调时,能发挥贯通钢筋的抗剪能力。构件 T-C-1, T-C-9, T-C-10 的荷载-位移曲线如图 3(d)所示,增加栓钉直径可提高组合剪力连接件的承载能力,且此影响并不是线性关系。

3 组合剪力连接件承载力计算方法

3.1 PBL 剪力键承载力计算公式

贯通钢筋直径、开孔尺寸、混凝土强度等都会影响 PBL 剪力键的承载能力。国内外很多学者对计算方法做了相应研究,得到了不同的计算公式,本文根据 EC4 规范公式、《钢-混凝土组合桥梁设计规范》

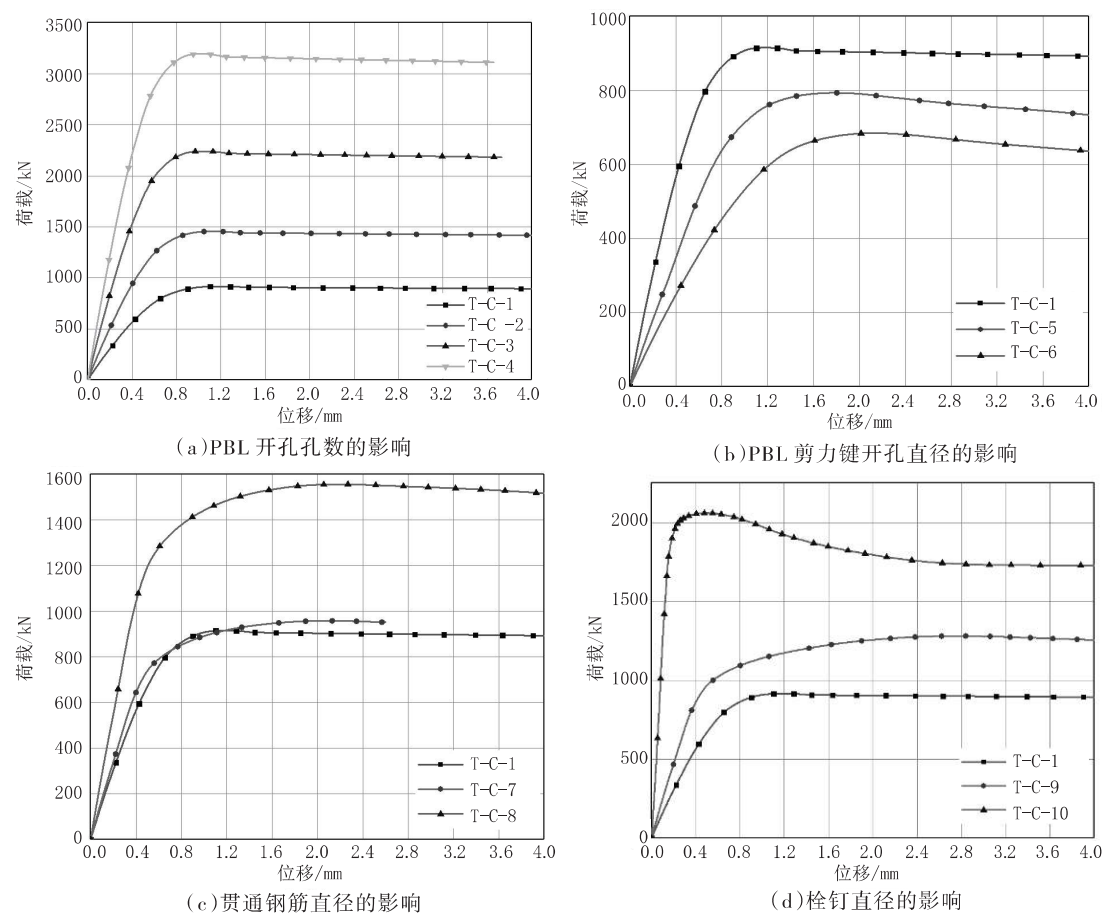


图 3

(GB 50917—2013)、赵晨公式、Hosaka 公式和 Leonhardt 公式五种计算方法,根据收集到^[13-15]的 71 组 PBL 剪力键试验结果,进行计算对比,结果如图 4 所示,图中 Pd 为 PBL 剪力键抗剪承载力计算值,Pt 为 PBL 剪力键抗剪承载力试验值。

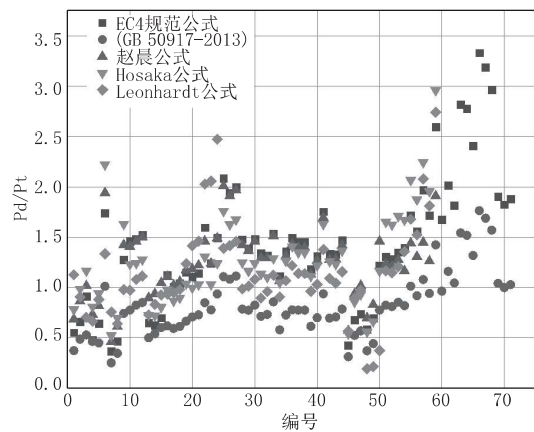


图 4 PBL 剪力键抗剪承载力计算值与试验值对比

由图 4 可知,上述五种计算方法所得结果的平均值分别为 1.43,0.82,1.24,1.25,1.14,标准差分别为 0.64,0.31,0.34,0.46,0.46,由此可见钢-混凝土组合桥梁设计规范(GB 50917—2013)中提出的公式与所选取的试验数据更为符合,计算公式为:

$$V_u = 2\alpha \left(\frac{\pi}{4} d^2 - \frac{\pi}{4} d_2^2 \right) f_{td} + 2 \frac{\pi}{4} d_2^2 f_{vd} \tag{1}$$

其中:α 为提高系数,取 6.1;d 为 PBL 剪力键开孔孔径;d₂ 为贯通钢筋直径;f_{td} 为混凝土轴心抗拉强度设计值;f_{vd} 为贯通钢筋抗剪强度设计值。

3.2 栓钉剪力键承载力计算公式

栓钉剪力键构件的破坏形式分为栓钉剪断和混凝土压碎两种,本文根据 EC4 规范公式、美国钢结构设计规范 ANSI/AISC、加拿大规范公式(CAN/CSA-S16-01)和丁发兴公式四种计算方法,根据收集到^[16-18]的 39 组栓钉剪力键试验结果,进行计算对比,结果如图 5 所示。

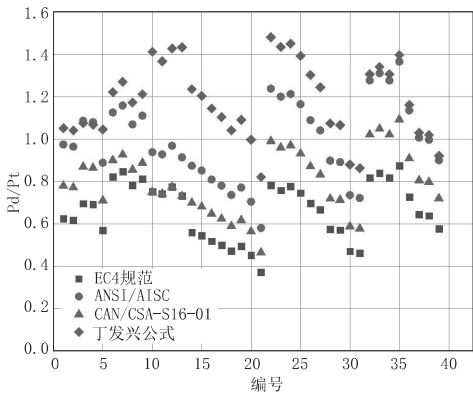


图 5 栓钉剪力键抗剪承载力计算值与试验值对比

由图5可知,上述四种计算方法所得结果的平均值分别为0.66,0.99,0.79,1.18,标准差分别为0.13,0.18,0.15,0.17,由此可见美国钢结构设计规范ANSI/AISC中提出的公式与所选取的试验数据更为符合,计算公式为:

$$V_u = 0.5A_s \sqrt{E_c f_c} \leq R_g R_p A_s F_u \quad (2)$$

其中: A_s 为栓钉面积; E_c 为混凝土弹性模量; f_c 为混凝土圆柱体抗压强度; R_p 和 R_g 为系数,当栓钉单排焊于翼缘板时, $R_g=1.0$,当栓钉焊接的翼缘板不超过混凝土板50%时, $R_p=1.0$ 。

3.3 组合剪力连接件承载力计算公式及验证

由上述计算结果可知,将计算PBL和栓钉连接件承载力公式精度最高的两公式叠加作为组合剪力连接件的计算公式,即:

$$V_u = 2\alpha \left(\frac{\pi}{4} d^2 - \frac{\pi}{4} d_2^2 \right) f_{td} + 2 \frac{\pi}{4} d_2^2 f_{vd} + 0.5A_s \sqrt{E_c f_c} \quad (3)$$

$$V_u = 2\alpha \left(\frac{\pi}{4} d^2 - \frac{\pi}{4} d_2^2 \right) f_{td} + 2 \frac{\pi}{4} d_2^2 f_{vd} + R_g R_p A_s F_u \quad (4)$$

其中:公式(3)适用于混凝土发生压溃破坏,公式(4)适用于栓钉剪断破坏。将本文所得的10个数值计算结果与公式计算结果进行对比,如图6所示。

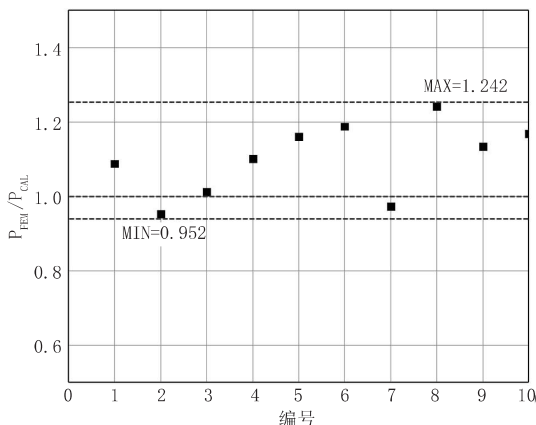


图6 组合剪力连接件抗剪承载力计算公式评估

图中PFEM为数值计算结果,PCAL为公式计算结果,由计算结果可知,数值计算结果与公式计算结果的比值平均值为1.101,标准差为0.091,计算结果吻合较好,且有较好的安全储备,表明所得公式可以用来预测此类组合剪力连接件的抗剪承载力。

4 结论

本文针对多排组合剪力连接件的抗剪承载能力进行了有限元分析,并基于叠加原理提出了一种承载力计算方法,可得出以下结论:

(1)利用软件验证了模型的可行性,在此基础上建立多排组合剪力连接件模型来分析其抗剪承载力

和荷载-滑移曲线。

(2)由参数分析结果可知,增加开孔孔数、开孔直径、贯通钢筋直径、栓钉直径均可有效提高组合剪力连接件的抗剪承载力。其中,开孔孔数在4以下时,各孔之间不会互相影响,承载力随孔数线性增加;贯通钢筋直径在16 mm以下时,其变化对极限承载力影响较小,当直径从16 mm增加至20 mm时,构件承载力有明显提高;栓钉直径与承载能力之间并不是线性增加关系。

(3)基于收集的71组PBL剪力键、39组栓钉剪力键的试验结果和国内外学者提出的公式,根据叠加原理提出了组合剪力连接件的计算公式,与有限元模拟结果吻合良好,可作为此类连接件设计计算的参考。

参考文献:

- [1] 陈迎春,廖宏,杜光明,等. $\phi 19$ mm 群钉抗剪性能试验研究及有限元分析[J]. 工程建设, 2020, 52(6): 6-12+54.
- [2] 林标义. 栓钉剪力连接件的承载能力研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [3] 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(01): 95-100.
- [4] Ahn J H, Lee C G, Won J H, et al. Shear resistance of the perfo-bond-rib shear connector depending on concrete strength and rib arrangement [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(10): 1295-1307.
- [5] 肖林,李小珍,卫星. PBL剪力键静载力学性能推出试验研究[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(3): 15-20.
- [6] 黄翔,李力,岳磊. 某大跨径斜拉桥钢-混结合段PBL剪力键承载力研究[J]. 桥梁建设, 2010, 40(3): 19-23.
- [7] 赵晨,刘玉擎. 开孔板连接件抗剪承载力试验研究[J]. 工程力学, 2012, 29(12): 349-354.
- [8] 苏庆田,李晨翔,王巍. 开孔板连接件剪切受力机理的试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(11): 1623-1629.
- [9] Zhang J D, Shoji A, Kobayashi K. Design of a PC boxgirder bridge with corrugated steel webs in Hanshin Expressway [C]//First International Structural Engineering and Construction Conference. Honolulu, USA, 2001: 581-586.
- [10] 陈海,郭子雄,刘阳,等. 新型组合剪力键抗剪机理及承载力计算方法研究[J]. 工程力学, 2019, 36(3): 159-168.
- [11] 赵本露. 钢-纤维陶粒混凝土组合梁组合剪力连接件力学性能[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2019.
- [12] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].
- [13] 杨勇,陈阳,蔡军伟. 开孔钢板剪力连接件静力性能试验[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3): 255-263.
- [14] 胡建华,叶梅新,黄琼. PBL剪力连接件承载力试验[J]. 中国公路学报, 2006(6): 65-72.
- [15] Zheng S, Liu Y, Yoda T, et al. Parametric study on shear capacity