

组合剪力连接件的抗拉承载力有限元分析

张成¹, 吴沛峰¹, 成浩伟², 张若瑜²

(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)

摘要:为研究组合剪力连接件在PBL高度、贯通钢筋直径、孔径大小、栓钉直径对抗拉承载力和荷载-滑移曲线的影响,使用有限元软件ABAQUS建立组合剪力键模型,通过现有试验对比验证可行性并进行参数化分析。结果表明:增加PBL高度、贯通钢筋直径、开孔孔径、栓钉直径能提高抗拉承载力。其中,增加PBL高度对抗拉承载力的增幅效果并不显著;开孔孔径与承载力之间并不是呈线性增长关系;当贯通钢筋直径从12 mm增加至16 mm时,构件的承载力有了显著提升;栓钉直径提升至16 mm时,构件的极限承载力明显增大;根据叠加原理,建立了组合剪力连接件抗拉承载力计算公式,计算值与数值模拟结果吻合度较高。

关键词:组合剪力连接件;有限元模型;抗拉承载力;荷载-滑移曲线

中图分类号: U441

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2022)09-0059-05

0 引言

钢-混凝土组合结构是由钢结构与混凝土结构组合而成并共同受力的一种结构,合理结构能充分发挥二者的优势性能。随着钢-混凝土组合结构在工程运用中的大量普及,研究发现剪力连接件在组合结构的协同工作中起到重要作用,国内的设计合理化与施工规范化使得PBL剪力连接件^[1-3]与栓钉连接件^[4-5]已成为国内使用范围最广的剪力连接件。

剪力连接件不仅需要抵抗钢梁与混凝土结构之间的剪力作用,还需要防止二者之间的掀起作用,当剪力连接件受剪时,由于钢梁与混凝土相互粘结的表面不平整以及混凝土与PBL剪力键、栓钉的泊松比不同,当两者产生相对位移时会产生表面分离^[6]。由此国内外学者对栓钉剪力键和PBL剪力键进行大量的研究与试验,围绕开孔孔径、埋置深度、环境温度、栓钉头部直径等因素,就其荷载-滑移曲线与极限抗拉承载力计算公式开展研究工作。谢剑等^[7]通过静力试验研究不同低温和不同埋深下对栓钉连接件抗拉性能的影响;李现辉等^[8]设计出腹板嵌入式为等腰梯形的剪力连接件,通过拔出实验得出破坏机理与拔出承载力;薛辉等^[9]通过自主设计加载装置来试验剪力连接件的极限抗拉承载力、相对位移、破坏状态,并由实验结果拟合出相匹配的极限抗拉拔的计算公式。

然而,目前少有多种连接件的共同作用的抗拉承载力的研究工作,当PBL连接件和栓钉连接件组合工作时,可能在抗拉承载力及其计算公式上发生改变,本文采用数值模拟的方法进行分析,以期对多排组合剪力连接件的抗拉承载力的深入研究提供参考。

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拉机理与力学性能,本节采用有限元软件ABAQUS建模。采用文献[6]中T-C构件模型,以PBL和栓钉组合剪力键的抗拉性能作为研究对象。由于工字钢的腹板对组合剪力键的抗拉不作影响,故将工字钢简化为钢板。有限元模型由钢板、栓钉、PBL剪力键、贯通钢筋、混凝土组成,将PBL剪力键与栓钉放置于钢板的上平面,PBL剪力键的尺寸为长200 mm,宽16 mm,高80 mm,其中部存在直径为40 mm的孔洞,贯通钢筋选用直径为10 mm的HPB400钢筋,栓钉使用加工直径为10 mm、长度为80 mm的Q235圆钢,强度等级为C50的混凝土下表面与钢板上表面相互接触,即PBL剪力键、栓钉和贯通钢筋均埋置于混凝土中。整体构件主要由一个PBL剪力键、四个栓钉及混凝土樁进行受力,模型见图1。

根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[10],混凝土采用塑性损伤模型(见图2),将C50混凝土材料的各项参数输入ABAQUS,钢板、PBL剪力键和贯通钢筋的本构关系采用双折线模型,栓钉拉伸屈服后仍能提供一定的抗力,故本构关系采用双斜线模型。

收稿日期: 2021-11-05

作者简介: 张成(1990—),男,本科,工程师,从事桥梁结构设计工作。

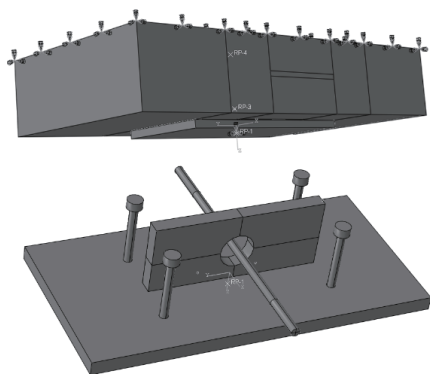


图1 组合剪力键有限元模型图

材料属性采用参考文献[6]中提供的数据。有限元模型中钢材、栓钉的应力应变曲线见图3、图4。

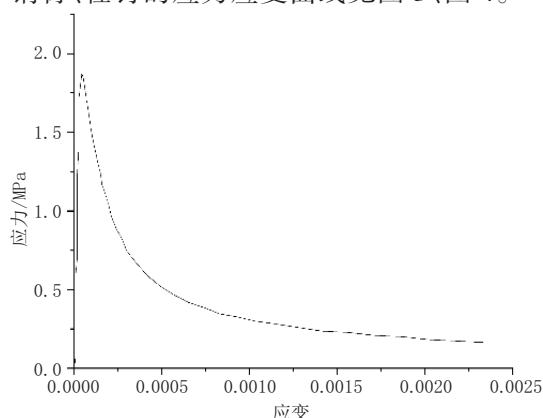


图2 C50混凝土塑性损伤模型

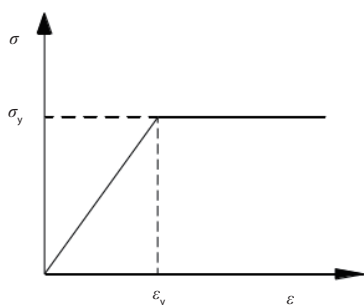


图3 有限元模型中钢材的应力应变曲线关系

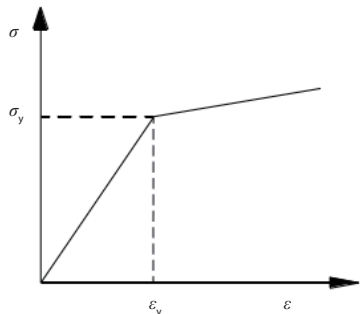


图4 有限元模型中栓钉的应力应变曲线关系

钢板与混凝土,混凝土与栓钉、PBL剪力键和贯通钢筋之间采用表面与表面接触模式来模拟粘结作用,且计算过程中不考虑贯通钢筋的滑移作用。切向行为以罚函数进行模拟,摩擦系数为0.2;法向行为采用硬接触并允许接触分离。钢板与PBL剪力键、栓

钉之间采用tie接触模式来模拟焊接。

加载时将混凝土的上表面自由度全部约束,以钢板的下表面作为加载面,并通过RP-1进行耦合,使其只能在竖直方向(U3)发生位移加载。

1.2 验证有限元模型

为验证上述有限元模型的可行性,将上述模拟结果与文献[6]计算的实验结果进行对比,荷载滑移曲线见图5,不难看出模拟结果与实验结果在数值与变化上相近。其中模拟结果的极限抗拉承载力为127.46 kN,实验结果的极限抗拉承载力为129.04 kN,其误差为1.23%。表明模拟效果良好,可进行组合剪力连接件抗拉承载力的有限元分析。

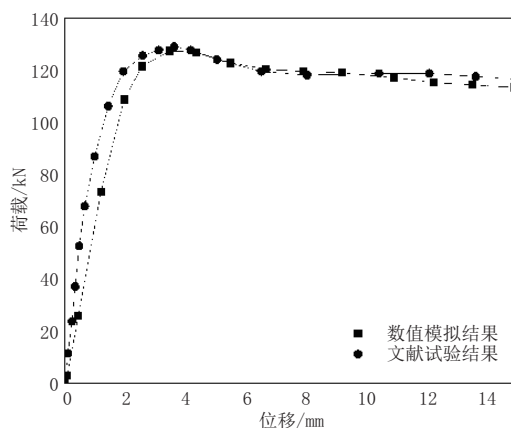


图5 数值计算结果和文献试验结果对比图

2 参数化分析

目前,国内缺乏组合剪力键的抗拉能力试验,本次有限元模拟结果将对抗拉承载力的计算公式提供参考。本次模型考虑了在不同的贯通钢筋直径、PBL剪力键的孔径、栓钉直径下的承载能力,对10个构件进行有限元模拟,构件参数见表1,有限元模拟见图6。

表1 构件尺寸参数

构件编号	开孔直径 /mm	贯通钢筋直径 /mm	栓钉直径 /mm	PBL高度 /mm
C30-10-10-80	30	10	10	80
C35-10-10-80	35	10	10	80
C40-10-10-80	40	10	10	80
C40-12-10-80	40	12	10	80
C40-16-10-80	40	16	10	80
C40-10-13-80	40	10	13	80
C40-10-16-80	40	10	16	80
C40-10-10-90	40	10	10	90
C40-10-10-100	40	10	10	100
C40-10-10-120	40	10	10	120

通过4组共10个构件的荷载-滑移曲线的对比,不难发现栓钉直径的变化对构件极限抗拉承载力的影响最大。由图6(a)可看出,开孔孔径与承载力

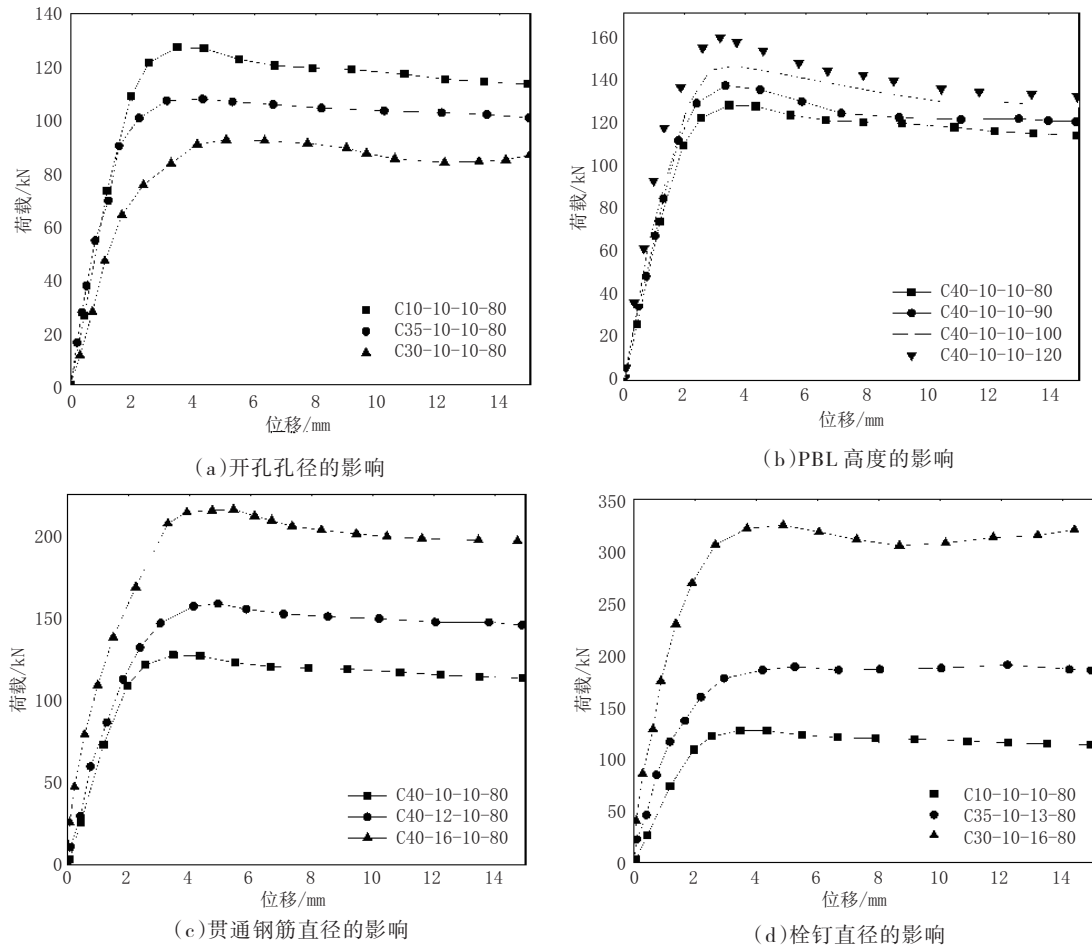


图6 有限元模拟

之间并不是呈线性增长关系;如图6(d)所示,栓钉直径小于13 mm时,荷载随着直径的增大而增大,且在位移为4 mm后,变化程度相对平缓;当栓钉直径提升至16 mm时,构件的极限承载力明显增大,说明此时发生的破坏主要为混凝土的挤压破坏。贯通钢筋对承载力的影响效果图为图6(c),当贯通钢筋直径在12 mm以下时,抗拉承载力提升较小,当直径从12 mm增加至16 mm时,构件的承载力有了显著提升;图6(b)代表PBL剪力键的高度对荷载-滑移曲线的影响,可以看出增加高度能提高极限承载力,但效果并不显著。

3 组合剪力键承载力计算公式

3.1 PBL剪力键抗拉承载力计算公式

实际上,贯通钢筋的直径、PBL剪力键的高度、孔径大小均会对其抗拉承载力产生影响。国内外学者均对其分析研究并整理出相应计算公式,本文结合了薛辉公式、胡建华公式、Young-Ho Kim公式、Hosaka公式、薛伟辰公式^[5,9,11-13]五种计算方法,根据收集到的数据进行计算值与理论值的对比,结果见图7。其中, P_c 为PBL剪力键的抗拉承载力计算值,

P_e 为PBL剪力键的抗拉承载力实验值。

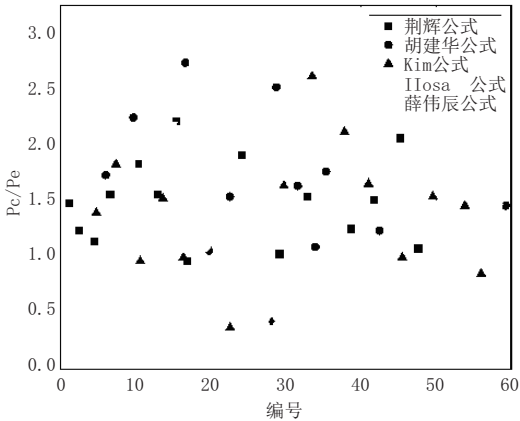


图7 PBL剪力连接件抗拉承载力计算值与实验值的比值

从图7可知,上述五种计算方法所得到的结果平均值分别为:1.39,1.67,1.88,1.46,1.32,标准差分别为0.27,0.39,0.43,0.63,0.46。由此可知薛辉所著论文中的计算公式与实验数据较为符合,综合考虑贯通钢筋与混凝土及混凝土樁的剪切作用,推出计算公式为:

$$T_u = 0.0081 \times \frac{1}{20} B H^2 f_{cu,k} + 0.4956 \times \frac{\pi}{4} D^2 f_{cu,k} + 2 \times \frac{\pi}{4} d_r^2 f_{vd} \quad (1)$$

式中: B 为PBL剪力键的厚度,取16 mm; H 为剪力键的高度; $f_{cu,k}$ 为混凝土立方体抗压强度标准值,取32.4 MPa; D 为孔洞直径; d_r 为贯通钢筋直径; f_{vd} 为贯通钢筋抗剪强度设计值。

3.2 栓钉剪力键抗拉承载力计算公式

当混凝土中的栓钉受拉屈服后,产生的破坏形式有混凝土被压碎,栓钉达到极限受拉承载力破坏。本文采用了蔺钊飞公式,马原公式和EC4规范公式^[14-16]三种计算方法,并通过收集到的栓钉连接件实验结果进行计算值与理论值对比,结果见图8。其中 T_c 为栓钉剪力键的抗拉承载力计算值, T_e 为栓钉剪力键的抗拉强度实验值。

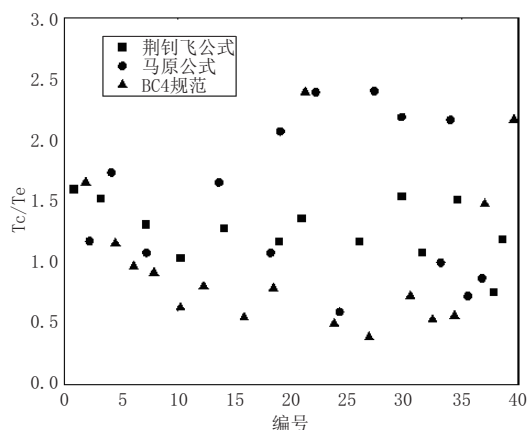


图8 栓钉剪力连接件抗拉承载力计算值与实验值的比值

从图8可知,上述三种计算方法所得到的结果平均值分别为:1.38,1.50,0.98,标准差分别为0.12,0.53,0.49。从以上计算结果可知,蔺钊飞所著论文中提及的计算公式与实验数据较为符合,其计算公式为:

$$N_{sa} = 4 \times 0.9 A_{se,N} \times f_{uta} \quad (2)$$

$$\text{或 } N_{cb} = 4 \times 1.05 \times h_{ef} (h_{ef} + d_h) \times \sqrt{f'_c} \quad (3)$$

式中: N_{sa} 为栓钉拉断时的抗拉承载力; $A_{se,N}$ 为栓钉杆部截面面积; f_{uta} 为栓钉材料极限抗拉强度,可取370 MPa; N_{cb} 为混凝土掀起破坏时的抗拉承载力; h_{ef} 为栓钉有效埋入深度,为栓钉头底部至混凝土下底面的距离,取70 mm; d_h 为栓钉头部直径; d_s 为栓钉杆部直径; f'_c 为混凝土圆柱体抗压强度, $f'_c = 0.79 f_{cu,k}$ 。

3.3 组合结构的抗拉承载力计算公式

由上述计算结果可知,将计算PBL剪力键和栓钉剪力键抗拉承载力公式叠加后作为组合结构剪力连接件的计算公式,并将已知数据代入后可简化,即:

$$N_u = 0.008 \times \frac{1}{20} B H^2 f_{cu,k} + 0.495 \times \frac{\pi}{4} D^2 f_{cu,k} +$$

$$\frac{\pi}{2} d_r^2 f_{vd} + 3.6 A_{se,N} \times f_{uta} \quad (4)$$

$$N_u = 0.008 \times \frac{1}{20} B H^2 f_{cu,k} + 0.495 \times \frac{\pi}{4} D^2 f_{cu,k} + \frac{\pi}{2} d_r^2 f_{vd} + 4.2 \times h_{ef} (h_{ef} + d_h) \times \sqrt{f'_c} \quad (5)$$

其中,式(4)适用于钢钉发生拉断破坏的情况,式(5)适用于混凝土发生掀起破坏的情况。将本文数值模拟的10种计算结果与公式计算结果进行对比,见图9。

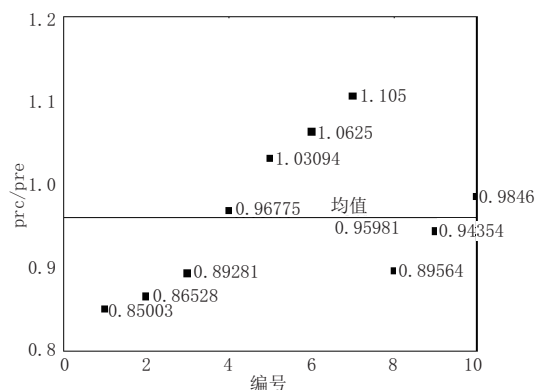


图9 组合剪力连接件抗拉承载力计算值与实验值的比值

图9中为数值模拟最终计算结果,为公式最终计算结果,可知两者比值的平均值为0.96,标准差为0.16。计算结果良好,表明式(4)或者式(5)可用作组合剪力键抗拉承载力的相应计算。

4 结论

本文针对组合剪力连接件的抗拉拔能力进行了有限元分析,并基于叠加原理提出了一种抗拉承载力计算公式,由此得出以下结论:

(1)本文利用有限元软件验证了模型的正确性,利用该模型分析研究了四种不同情况下的抗拉承载力变化情况及荷载-位移曲线,并依据模拟结果建立计算公式。

(2)由参数分析可知,增加PBL剪力键高度,孔径直径,贯通钢筋直径,栓钉直径均可不同程度地提高组合剪力连接件的抗拉承载力。其中,栓钉直径和贯通钢筋直径对数值计算结果的影响较大,当贯通钢筋直径在12 mm以下时,抗拉承载力提升较小,当直径从12 mm增加至16 mm时,构件的承载力有了显著提升;当栓钉直径小于13 mm时,发生的破坏一般为栓钉拉断,当栓钉直径提升至16 mm时,混凝土被压碎的可能性较高;PBL剪力键的高度对承载力的提高效果并不显著,且高度与承载力之间并不是线性增加关系。

(3)基于收集到的实验数据和国内外学者提出的公式,整合后通过数值模拟进行验证,认为结果吻合良好,可作为组合连接件设计计算的参考。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 杨欣松,王志宇,付磊,等.PBL 剪力连接件的推出及拔出试验力学性能研究[J].四川理工学院学报(自然科学版),2017,30(2):71-76.
- [3] 宗周红,车惠民.剪力连接件静载和疲劳试验研究[J].福州大学学报(自然科学版),1999,27(6):61-66.
- [4] Dennis L,Ehab E.Behavior of headed stud shear connectors in composite beam[J].Journal of Structural Engineering,2005,131(1):96-107.
- [5] Xue W C,Ding M,Wang H,et al.Static behavior and theoretical model of stud shear connectors[J].Journal of Bridge Engineering,2008,13(6):623-634.
- [6] 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.
- [7] 谢剑,亢二聪,严加宝,等.低温环境下栓钉连接件抗拉拔性能研究[J].建筑结构学报,2019,42(1):386-394.
- [8] 李现辉,李国强.腹板嵌入式组合梁抗剪连接件拔出试验[J].建筑科学与工程学报,2009,26(1):43-48.
- [9] 薛辉,王志宇.PBL 与 PZ 型剪力连接件抗拉拔性能试验[J].四川大学学报,2016,48(6):68-76.
- [10] GB 50010—2010,混凝土结构设计规范[S].
- [11] 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,2016,19(6):65-72.
- [12] Young-Ho Kim,Jae-Yoon Kang,Hyun-Bon Koo,et al.Pull-Out Resistance Capacity of a New Perfobond Shear Connector for Steel Pile Cap Strengthening[J].Advances in Materials Science and Engineering,2016.
- [13] Hosaka T.Study on shear strength and design method of perfobond strip[J].Japanese Journals of Structural Engineering,2002.
- [14] 蔺钊飞,刘玉擎.焊钉连接件拉剪相关关系模型实验[J].中国公路学报.2015,28(1):80-86.
- [15] 马原.组合结构栓钉连接件抗拔性能研究[D].北京:清华大学,2015.
- [16] Eurocode 4,Design of Composite Steel and Concrete Structures[S].2005.

~~~~~  
(上接第 58 页)

力和弯矩;采用 Z2 支座布置形式需要重点考虑纵桥向制动支座对主梁约束产生的方向相反的纵向力水平力和桥墩扭矩;在设计分析计算时,需要按照实际考虑桥墩刚度和支座刚度,并依据计算结果核实支座水平力是否满足要求,主梁与桥墩的构造和配筋是否满足要求。

#### 参考文献:

- [1] 范立础.桥梁工程[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [2] 项海帆,等.高等桥梁结构理论[M].北京:人民交通出版社,2013.
- [3] 徐栋,赵瑜,刘超.混凝土桥梁结构实用精细化分析与配筋设计[M].北京:人民交通出版社,2013.
- [4] 邵容光,夏滢.混凝土弯梁桥[M].北京:人民交通出版社,1994.