

焊钉连接件抗拉承载力试验

蔺钊飞, 刘玉擎

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 为建立组合结构桥梁常用焊钉连接件的抗拉承载力计算方法, 进行了高度分别为 100、200、300 和 400 mm 的焊钉连接件抗拉承载性能模型试验, 比较分析了高度对破坏模式、承载力和峰值分离的影响; 基于国内外 93 个模型试验结果, 比较分析了 ACI 318-08、PCI 5th 和 CEB-ECCS 等标准所建议抗拉承载力计算式与试验结果的吻合度; 给出了防止焊钉拔出、边缘混凝土压裂和混凝土掀起等脆性破坏的限制条件; 结合脆性破坏限制条件和延性破坏抗拉承载力计算式提出了焊钉连接件延性破坏抗拉承载力计算方法。研究结果表明: 焊钉受拉延性破坏时的承载力和峰值分离约为脆性破坏时的 1.5 和 5.8 倍; ACI 318-08 所建议计算式与试验结果吻合度较高; 分别采用混凝土强度等级、焊钉缘端距离及焊钉高径比作为限制条件, 能够防止焊钉受拉时发生脆性破坏; 提出的焊钉连接件延性破坏抗拉承载力计算方法, 可为焊钉连接件的延性设计提供参考。

关键词: 组合结构桥梁; 焊钉连接件; 抗拉承载力; 模型试验; 计算方法

中图分类号: U441

文献标志码: A

Experimental study on static behavior of headed studs under tension force

LIN Zhao-fei, LIU Yu-qing

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to develop the calculation method for the tensile strength of headed studs widely used in steel-concrete composite bridges, four groups of pull-out specimens with different stud heights were tested. The overall stud heights used in the four groups were 100, 200, 300 and 400 mm, respectively. Based on the test results, the effect of stud height on failure mode, tensile strength and peak separation were investigated. Tensile strength equations specified in existing codes (ACI 318-08, PCI 5th and CEB-ECCS) were evaluated based on 93 test data of this study and other

researches. In addition, constraint equations for preventing the brittle failure modes of stud pullout, side-face blowout and concrete breakout were developed. Finally, calculation method of the ductile tensile strength of headed studs was proposed. The results indicate that the tensile strength and peak separation of the specimens failed due to steel failure are 1.5 times and 5.8 times as large as those of the specimens failed due to concrete breakout failure, respectively. The strength equations given by ACI 318-08 give more accurate predictions than those in the other codes. The minimum concrete compressive strength, minimum distance from stud center to concrete edge and stud height-diameter ratio are employed as constraints to prevent the brittle failure modes. The proposed calculation method of the ductile tensile strength of headed studs can provide guidance when designing headed studs under tension force.

Key words: steel-concrete composite bridges; headed studs; tensile strength; pull-out test; calculation method

焊钉连接件广泛应用于组合结构桥梁钢-混凝土结合面抵抗剪力, 既往研究主要集中于其抗剪受力性能^[1-2]。随着组合结构桥梁的发展, 焊钉连接件应用范围更加广泛, 除受到剪力作用外, 亦常处于受拉或拉剪共同作用状态。上海长江大桥连续梁和东海大桥斜拉桥分别在组合梁钢-混凝土结合面采用高 300 和 450 mm 的焊钉来抵抗拉力作用。

McMackin^[3]和 Pallarés^[4]研究表明, 在拉力作用下, 焊钉连接件主要呈现混凝土掀起的脆性破坏和焊钉拉断的延性破坏等破坏模式, 并建议基于焊钉延性破坏进行焊钉连接件抗拉承载力设计计算。焊钉发生延性破坏时, 变形较大, 有利于在极限状态下焊钉内力的重分布和整体结构的塑性发展。ACI^[5]和 PCI^[6-7]等标准在早期版本中就已包含针对不同破坏模式的焊钉连接件抗拉承载力计算式。然而, 所

收稿日期: 2014-07-22

第一作者: 蔺钊飞(1988—), 男, 博士生, 主要研究方向为组合结构桥梁。E-mail: linzhaofei2012@gmail.com

通讯作者: 刘玉擎(1962—), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为组合结构桥梁。E-mail: yql@tongji.edu.cn

提计算式所依据的试验数据中,焊钉高度相对较小、混凝土强度相对较低^[4,8].国内对于焊钉连接件的抗拉性能研究十分缺乏,尚无相应的设计标准.为此,有必要给出防止焊钉连接件受拉发生脆性破坏的限制条件,提出基于延性破坏的焊钉连接件抗拉承载力计算方法.

本研究进行了不同高度的焊钉连接件抗拉承载力性能模型试验,分析了焊钉高度对破坏模式、承载力、峰值分离的影响;比较了 ACI 318-08、PCI 5 th 和 CEB-ECCS 等标准所建议抗拉承载力计算式与试验结果的吻合度;给出了防止焊钉受拉发生脆性破坏的限制条件,并提出了基于延性破坏的焊钉连接件抗拉承载力计算方法.

1 焊钉连接件抗拉模型试验

表 1 为焊钉连接件抗拉模型试件分组,主要考虑焊钉高度的影响.焊钉直径 d_s 为 22 mm,高度 h_s 为 100、200、300 和 400 mm,极限强度 f_{su} 为 519 MPa,混凝土立方体抗压强度 f_{cu} 为 62.6 MPa.

表 1 试件分组

Tab.1 Grouping of test specimens

试件分组	试件个数/个	d_s/mm	h_s/mm	f_{su}/MPa	f_{cu}/MPa
ST-1	3	22	100	519.0	62.6
ST-2	3	22	200	519.0	62.6
ST-3	3	22	300	519.0	62.6
ST-4	3	22	400	519.0	62.6

模型试件构造如图 1 所示,钢梁下翼缘对称设置加载孔,下翼缘中心处焊接焊钉连接件.将焊有焊钉的钢梁倒置,在与混凝土接触的钢翼缘板上涂抹润滑油以减小钢与混凝土间的粘阻力,焊钉正立浇筑混凝土.

试验加载装置如图 2 所示,采用放置于加载孔中的两个千斤顶对称加载,结构处于自平衡状态.试件混凝土块底部布置沙垫层以确保结构两侧施力和受力的均匀,并在混凝土块前后与千斤顶相同横向位置处布置 2 个位移计测试钢梁与混凝土块的相对分离量.

2 抗拉试验结果及分析

2.1 抗拉承载力及峰值分离

表 2 所示为焊钉连接件抗拉承载力 N_u 与峰值分离 d_p (拉力-分离曲线上最大拉力对应的分离值) 的试验结果.当焊钉高度为 100 mm 时,破坏模式为

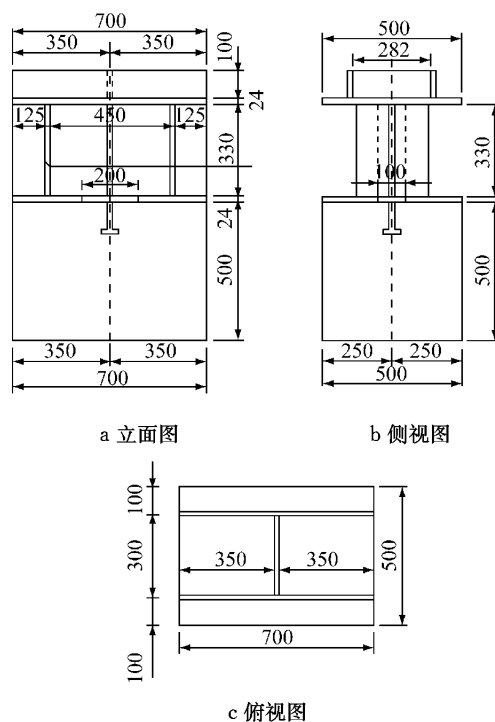


图 1 模型试件(单位:mm)

Fig.1 Details of test specimens(unit: mm)

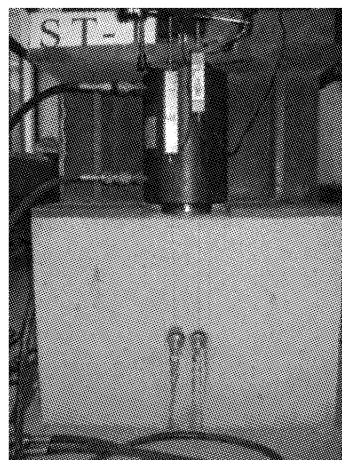


图 2 试验加载装置

Fig.2 Test set-up

表 2 抗拉承载力和峰值分离试验结果

Tab.2 Results of tensile strength and peak separation

试件 分组	试件 1		试件 2		试件 3	
	N_u/kN	d_p/mm	N_u/kN	d_p/mm	N_u/kN	d_p/mm
ST-1	111.8	3.56	98.7	1.13	115.5	1.94
ST-2	154.6	10.17	174.8	10.86	159.6	10.36
ST-3	168.8	12.57	172.2	13.38	172.8	13.54
ST-4	171.9	18.97	159.3	16.48	164.6	11.97

混凝土掀起,抗拉承载力较低,峰值分离较小,变形性能较差.当焊钉高度为 200~400 mm 时,破坏模式为焊钉拉断,抗拉承载力相对较高,峰值分离较大,变形性能较好.焊钉拉断破坏时,峰值分离随焊

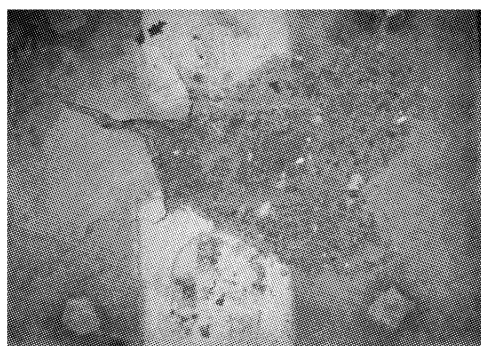
钉高度的增加而增大,抗拉承载力随高度增加变化较小。

2.2 破坏模式

图3所示为ST-1组试件破坏状态,3个试件均为混凝土掀起的脆性破坏,混凝土破坏面呈曲面,在焊钉头部破坏面的切面近似垂直于混凝土块顶面,随着远离焊钉,切面与顶面夹角逐渐减小,至顶面处切面近似平行于顶面。



a 钢梁侧

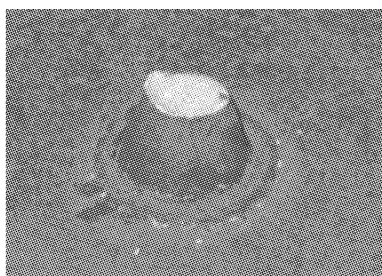


b 混凝土侧

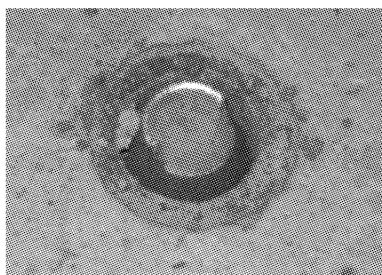
图3 混凝土掀起破坏

Fig.3 Concrete breakout failure

图4所示为ST-2~ST-4组试件破坏状态,9个试件均为焊钉杆部拉断的延性破坏,破坏处焊钉杆部发生明显颈缩,断面面积显著减少。



a 钢梁侧



b 混凝土侧

图4 焊钉拉断破坏

Fig.4 Stud fracture

2.3 拉力-分离曲线

图5所示为不同高度焊钉连接件的拉力-分离曲线。对于4组试件,在达到 $0.5N_u$ 之前,拉力-分离曲线近似为线性。ST-1组试件为混凝土掀起破坏,近似以线性状态达到极限拉力,对应峰值分离最大值为3.56 mm,随后的下降段较陡,延性较差。ST-2~ST-4组试件为焊钉杆部拉断破坏,在达到约0.75倍极限拉力时焊钉开始屈服,对应分离量约为1.3 mm;3组试件峰值分离均超过10.0 mm,呈现出较好的变形性能。

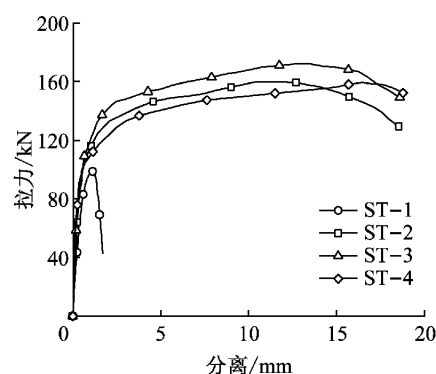


图5 拉力-分离曲线

Fig.5 Load-separation Curves

3 抗拉承载力计算式比较分析

研究表明^[3-4,7-9],焊钉连接件受到拉力时主要发生焊钉拉断、混凝土掀起、焊钉拔出、边缘混凝土压裂和混凝土割裂破坏。当焊钉埋深较大时,倾向于发生焊钉拉断破坏。当焊钉埋深较小、混凝土强度较低时,倾向于发生混凝土掀起破坏。当焊钉头部直径相对于杆部直径较小时,倾向于发生焊钉拔出破坏。当焊钉距离边缘较近时,倾向于发生边缘混凝土压裂破坏。当混凝土构件相对较薄时,倾向于发生混凝土割裂破坏。其中焊钉拉断和混凝土掀起为主要破坏模式。

表3所示为各标准建议的焊钉连接件抗拉承载力计算式。表中: N_{sa} 为焊钉拉断时的名义抗拉承载力,N; $A_{se,N}$ 为焊钉杆部截面面积, mm^2 ; f_{uta} 为焊钉材料极限抗拉强度,MPa; N_{cb} 为混凝土掀起破坏时的名义抗拉承载力,N; f_c' 为混凝土圆柱体抗压强度,MPa; h_{ef} 为焊钉有效埋入深度,为焊钉头底面至混凝土顶面距离,mm; $c_{a,min}$ 为焊钉截面中心至混凝土边缘最小距离,mm。 $\phi_{ed,N}$ 为考虑边缘影响的修正系数,当焊钉中心至边缘距离 $c_{a,min} \leq 1.5h_{ef}$ 时, $\phi_{ed,N} = 0.7$

$+0.3(c_{a,\min}/1.5h_{ef})$; 当 $c_{a,\min} \geq 1.5h_{ef}$ 时, $\psi_{ed,N} = 1$. $\psi_{c,N}$ 为混凝土掀起破坏时混凝土开裂修正系数, 在正常使用状态下混凝土未开裂时, 取 1.25, 开裂时取 1.0; N_{pn} 为焊钉拔出破坏时的名义抗拉承载力, N; $\psi_{c,p}$ 为焊钉拔出破坏时混凝土开裂修正系数, 在正常使用状态下混凝土未开裂时, 取 1.4, 开裂时取 1.0; d_h 为焊钉头部直径, mm; A_{brg} 为焊钉头部的净支撑面积, $A_{brg} = \pi(d_h^2 - d_s^2)/4$, mm². N_{sb} 为边缘混凝土压裂时的名义抗拉承载力, N. 所建议的焊钉拉断承载力计算式较为一致, 认为近似于焊钉杆部单轴受拉破坏, 采用对焊钉杆部截面与焊钉材料极限强度的乘积进行折减的方法. 混凝土掀起破坏主要采用混凝土 45° 锥形破坏法或混凝土承载性能设计法计算抗拉承载力. ACI 318-08^[5] 和 PCI 6th^[7] 采用混凝土承载性能设计法, PCI 5th^[6] 和 CEB-ECCS^[9] 采用混凝土 45° 锥形破坏法

表 3 抗拉承载力计算式

Tab.3 Equations for calculating the tensile strength			
标准	破坏模式	计算式	编号
ACI 318-08 ^[5]	焊钉拉断	$N_{sa} = A_{sc,N} f_{uta}$	(1)
	混凝土掀起	$N_{cb} = \psi_{ed,N} \psi_{c,N} N_b$	(2)
		$N_b = 10 \sqrt{f'_c} h_{ef}^{1.5}$	(3)
	焊钉拔出	$N_{pn} = \psi_{c,p} N_p$	(4)
		$N_p = 8 A_{brg} f'_c$	(5)
PCI 5th ^[6]	边缘混凝土压裂	$N_{sb} = 13 c_{a,\min} \sqrt{A_{brg}} \sqrt{f'_c}$	(6)
	焊钉拉断	$N_{sa} = 0.9 A_{sc,N} f_{uta}$	(7)
	混凝土掀起	$N_{cb} = 1.05 h_{ef} (h_{ef} + d_h) \sqrt{f'_c}$	(8)
CEB-ECCS ^[9]	焊钉拉断	$N_{sa} = A_{sc,N} f_{uta}$	(9)
	混凝土掀起	$N_{cb} = 1.28 h_s^2 \sqrt{f'_c}$	(10)

为比较不同标准抗拉承载力计算值与试验值的吻合度, 收集了国内外共计 93 个焊钉连接件抗拉性能试验结果^[3,10-14], 其中混凝土掀起破坏数据 46 个, 焊钉拉断破坏数据 47 个, 见表 4. 图 6 和图 7 所示分别为混凝土掀起破坏和焊钉拉断破坏时, 按照 ACI 318-08、PCI 5th 和 CEB-ECCS 计算的名义抗拉承载力计算值与试验结果的对比. μ 为计算值与试验值比值的平均值, σ^2 为计算值与试验值比值的方差. 相对于焊钉拉断破坏, 混凝土掀起破坏时, 不确定影响因素较多, 离散度较大. 由计算值与试验值比值的平均值和方差可知, 相对于 PCI 5th 和 CEB-ECCS, ACI 318-08 计算值与试验值具有更高的吻合度.

此外, ACI 318-08 计算式的合理性和可靠性亦得到了其他学者研究的证明^[4,15-17], 并被 PCI 6th 采用, 因此, 建议采用 ACI 318-08 计算式计算焊钉连

接件名义抗拉承载力.

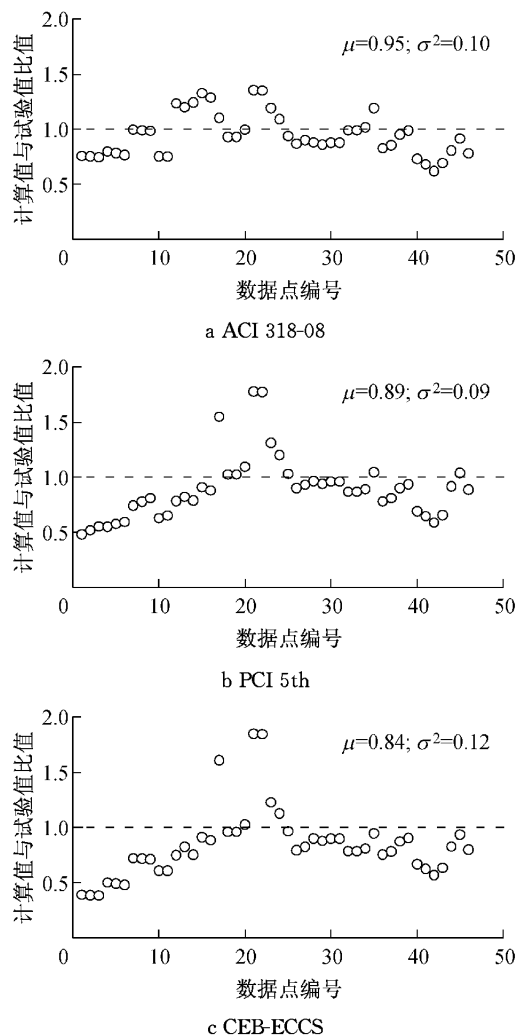


图 6 混凝土掀起破坏抗拉承载力计算值与试验值比较

Fig. 6 Comparison of concrete break-out strength derived from test results and those computed using existing codes

4 防止焊钉连接件受拉脆性破坏的限制条件

ACI 318-08 和 PCI 6th 建议尽可能使焊钉连接件受拉发生焊钉拉断的延性破坏. 相对于焊钉连接件受拉脆性破坏, 延性破坏前焊钉的变形较大, 有利于焊钉内力重分布和整体结构的塑性发展. 为此, 结合 ACI 318-08 建议的不同破坏模式抗拉承载力计算式, 提出防止焊钉拔出、边缘混凝土压裂和混凝土掀起破坏先于焊钉杆部拉断的限制条件. 当在周围配有足够钢筋时, 焊钉连接件受拉基本不会发生混凝土劈裂破坏^[5].

此外, 由于焊钉周围混凝土中钢筋的加强作用,

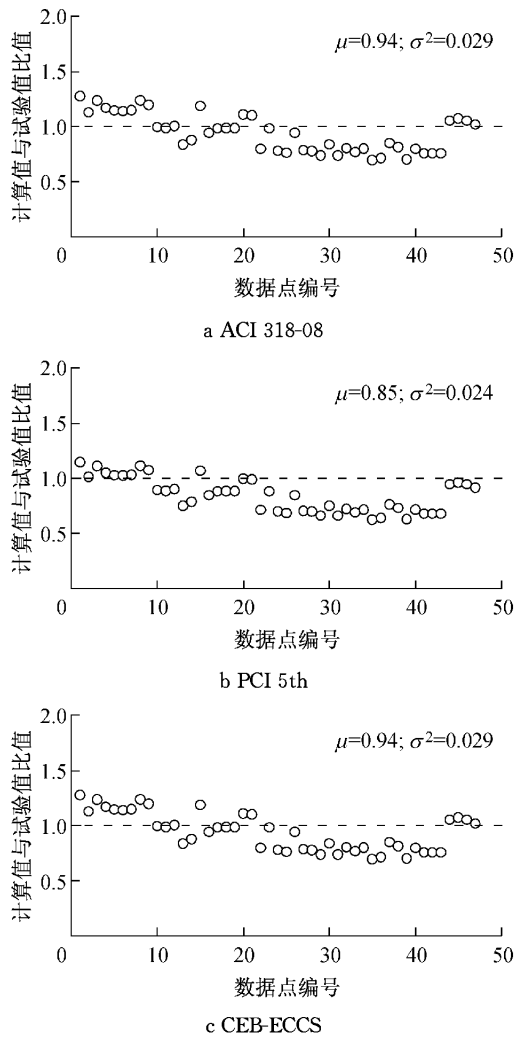


图7 焊钉拉断破坏抗拉承载力计算值与试验值比较

Fig. 7 Comparison of ductile tensile strength derived from test results and those computed using existing codes

且对于预制混凝土结构常施加预应力,正常使用状态下混凝土一般无裂缝^[4,7,17],则在以下分析中,假定正常使用状态下焊钉周围混凝土未开裂。

为便于实际应用,采用《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》^[18]规定的焊钉头部高度 h_h ,将有效埋入深度 h_{ef} 转换为焊钉全高 h_s 。此外,采用式(11)将混凝土圆柱体抗压强度转换为轴心抗压强度。式(11)为依照Eurocode 4^[19]和《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》^[20]取得不同混凝土圆柱体抗压强度等级与棱柱体轴心抗压强度关系,进行拟合得到。

$$f'_c = 1.36f_{ck} - 3.52 \quad (11)$$

式中: f_{ck} 为混凝土强度。

4.1 防止焊钉拔出破坏的限制条件

为防止焊钉拔出破坏需使按照式(4)计算的抗拉承载力大于式(1)的计算值,即:

$$\frac{f_{su}}{15.2[(d_h/d_s)^2 - 1]} + 2.6 \leq f_{ck} \quad (12)$$

按照《冷墩和冷挤压用钢》^[21]规定,焊钉材料的最大极限强度 f_{su} 为530 MPa。按照《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》规定,焊钉头部直径 d_h 和焊钉杆直径 d_s 位于一定限值内,对于常用16、19、22和25 mm焊钉, d_h/d_s 最小值分别为1.79、1.66、1.57和1.58。表5所示为将上述限值代入式(12)得到的不同直径焊钉为防止焊钉拔出破坏先于焊钉拉断破坏所要求的最低混凝土抗压强度 $f_{ck,min}$ 和满足限值的混凝土最低强度等级。对于直径16~25 mm焊钉,所需 $f_{ck,min}$ 最大值为26.4 MPa,则当混凝土强度等级不小于C40时,可基本确保焊钉拔出后于焊钉拉断破坏。

表4 既往研究试验参数

Tab.4 Variables of the previous researches

研究者	d_s/mm	h_s/d_s	f_{su}/MPa	f'_c/MPa
McMackin 等 ^[3]	19~22	5.3~10.7	441.3	33.8~35.7
Sarri 等 ^[10]	19	6.7	413.7	30.5
Nelson stud welding ^[11]	6~22	4.0~10.3	413.7	20.3~21.4
Ohtani 等 ^[12]	13~19	4.2~7.7	474.3	31.0~34.7
Al-taan 等 ^[13]	8~12	2.1~7.8	414.0~1034.0	33.8~35.7
Collins 等 ^[14]	19~22	5.3~10.7	413.7~827.4	33.8~35.7

表5 混凝土强度最小值 $f_{ck,min}$ 限制条件Tab.5 Limits on the minimum value of f_{ck}

焊钉直径/mm	16	19	22	25
$f_{ck,min}/\text{MPa}$	18.4	22.4	26.4	25.9
混凝土强度等级	C30	C35	C40	C40

4.2 防止边缘混凝土压裂破坏的限制条件

当 $c_e/h_s \geq 0.4$ 时,ACI 318-08 规定可认为不会发生边缘混凝土的压裂破坏。 c_e 为焊钉中心至混凝土

边缘最小距离。

当 $c_e/h_s \leq 0.4$ 时,防止边缘混凝土压裂破坏需使按照式(6)计算的抗拉承载力大于式(1)的计算值,即:

$$\frac{d_s f_{su}}{14.7 \sqrt{1.36f_{ck} - 3.52} \sqrt{(d_h/d_s)^2 - 1}} \leq c_e \quad (13)$$

图 8 所示为当 f_{su} 为 530 MPa 时,为防止边缘混凝土压裂先于焊钉拉断破坏,焊钉中心至混凝土边缘最小距离的最小值 $c_{e,min}$ 和混凝土抗压强度 f_{ck} 的关系.表 6 所示为当 f_{su} 为 530 MPa 时,常用混凝土强度等级和焊钉直径的焊钉中心至混凝土边缘最小距离的最小值 $c_{e,min}$.所需 $c_{e,min}$ 随着混凝土强度的增加而减小,随着焊钉直径的增加而增大.对于常用的直径 22 mm 焊钉,当混凝土强度等级为 C50 时,需 $c_{e,min}$ 约为 100 mm.

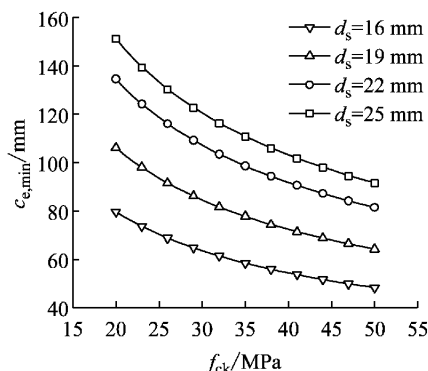


图 8 混凝土抗压强度与焊钉中心至混凝土边缘最小距离的最小值关系

Fig. 8 Relationship of concrete compressive strength and minimum value of the closest distance from stud center to edges of concrete element

表 6 混凝土边缘最小距离的最小值 $c_{e,min}$ 限制条件

Tab. 6 Limitations on the value of $c_{e,min}$

混凝土 强度等级	焊钉直径/mm			
	16	19	22	25
C30	80	106	134	151
C35	73	97	123	138
C40	68	90	114	128
C45	64	86	108	122
C50	61	81	102	116
C55	59	78	98	110
C60	55	74	93	106

4.3 防止混凝土掀起破坏的限制条件

使混凝土掀起破坏后于焊钉拉断破坏需使按照式(2)计算的抗拉承载力大于式(1)的计算值,即:

$$\frac{d_s^{4/3} f_{su}^{2/3}}{6.3 \left(0.7 + 0.3 \frac{c_e}{1.5 h_s} \right)^{2/3} (1.36 f_{ck} - 3.52)^{1/3}} \leq h_s - h_h \quad (14)$$

其中,当 $c_e/h_s \geq 1.5$ 时,取 1.5.

图 9 所示为当 f_{su} 为 530 MPa, $c_e/h_s \geq 1.5$ 时,为防止混凝土掀起先于焊钉拉断破坏,焊钉高度与直径比值的最小值 $(h_s/d_s)_{min}$ 与混凝土强度 f_{ck} 的关系.

表 7 所示为当 f_{su} 为 530 MPa, $c_e/h_s \geq 1.5$ 时,常用混凝土强度等级和焊钉直径的焊钉高度与直径比值最小值 $(h_s/d_s)_{min}$.当 $c_e/h_s \leq 1.5$ 时,将 $c_e/h_s \geq 1.5$ 时的 $(h_s/d_s)_{min}$ 乘以系数 $(0.7 + 0.3(c_e/1.5 h_s))^{-2/3}$ 即可.所需焊钉高度与直径比值最小值 $(h_s/d_s)_{min}$,随着混凝土抗压强度的增加而减小,随着焊钉直径的增加而增大.对于常用的直径 22 mm 焊钉,混凝土强度等级为 C50 时,焊钉高度宜不小于 200 mm.

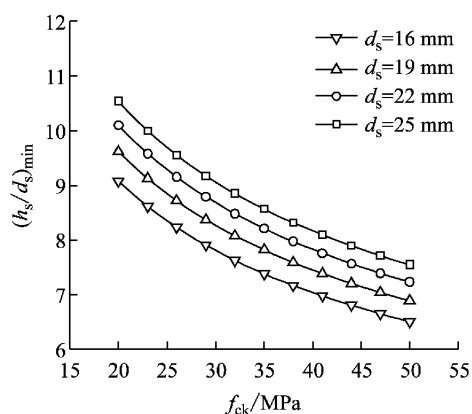


图 9 焊钉高径比最小值 $(h_s/d_s)_{min}$ 与混凝土强度的关系
Fig. 9 Relationship of concrete compressive strength and the minimum value of stud height-diameter ratio

表 7 焊钉高径比最小值 $(h_s/d_s)_{min}$ 限制条件

Tab. 7 Limitations on the value of $(h_s/d_s)_{min}$

混凝土 强度等级	焊钉直径/mm			
	16	19	22	25
C30	9.8	10.2	10.6	11.0
C35	9.3	9.7	10.1	10.4
C40	8.9	9.2	9.6	9.9
C45	8.6	8.9	9.3	9.6
C50	8.3	8.7	9.0	9.3
C55	8.1	8.4	8.7	9.0
C60	7.9	8.2	8.5	8.8

5 焊钉延性破坏抗拉承载力计算方法

图 10 所示为焊钉连接件延性破坏抗拉承载力计算流程图.倘若所拟定参数 f_{ck} 、 d_s 、 h_s 和 c_e 满足该流程图,则满足第 4.1~4.3 节限制条件,可防止焊钉连接件抗拉脆性破坏.发生焊钉拉断的延性破坏,可按照式(1)计算抗拉承载力.《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》规定,焊钉材料最小抗拉强度为 400 MPa,当缺乏焊钉材料极限抗拉强度 f_{su} 数据时,取 400 MPa 计算.

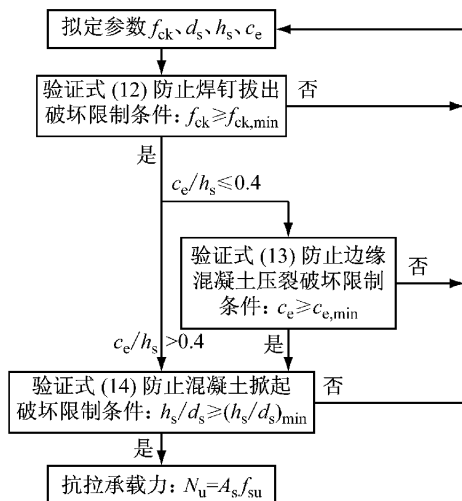


图10 焊钉连接件延性破坏抗拉承载力计算流程

Fig. 10 Flowchart for calculating tensile strength of headed studs due to steel failure

6 结论

(1) 通过焊钉连接件抗拉承载性能模型试验可知,当焊钉高度与直径的比值较小时发生混凝土掀起的脆性破坏;当高径比较大时,发生焊钉拉断的延性破坏。

(2) 焊钉连接件发生混凝土掀起的脆性破坏时,抗拉承载力较低,峰值分离较小,变形性能较差;发生焊钉拉断的延性破坏时,抗拉承载力相对较高,峰值分离较大,变形性能较好。延性破坏时,峰值分离随焊钉高度的增加而增大,抗拉承载力随高度增加变化较小。

(3) 基于国内外共93个焊钉抗拉承载性能试验结果,比较分析了ACI 318-08、PCI 5th和CEB-ECCS等标准所建议抗拉承载力计算式与试验结果的吻合度,结果表明ACI 318-08给出的计算式较为合理。

(4) 结合ACI 318-08和中国相关现行标准给出了防止焊钉连接件受拉时发生焊钉拔出、边缘混凝土压裂和混凝土掀起等脆性破坏的限制条件,分别采用混凝土强度等级、焊钉缘端距离和焊钉高径比加以限制;并提出了基于延性破坏的焊钉抗拉承载力计算方法。

参考文献:

[1] Olgaard 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.

[2] 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.

[3] McMackin P J, Slutter R G, Fisher J W. Headed steel anchor under combined loading [J]. AISC Engineering Journal, 1973, 10(2):43.

[4] Pallarés L, Hajjar J F. Headed steel stud anchors in composite structures, Part II -Tension and interaction [R]. Urbana: Newmark Structural Engineering Laboratory, 2009.

[5] ACI 318-08. Building Code Requirements for Structure Concrete and Commentary [S]. Michigan: American concrete Institute, 2008.

[6] PCI Design Handbook; Precast and Prestressed Concrete[S]. 5th ed. Chicago: Precast/Prestressed Concrete Institute, 1999.

[7] PCI Design Handbook; Precast and prestressed concrete[S]. 6th ed. Chicago: Precast/Prestressed Concrete Institute, 2004.

[8] Hiragi H, Matsui S, Sato T, *et al.* Pull-out and shear strength equations for headed studs considering edge distance [J]. Proceedings of JSCE, 2002(703):279.

[9] Joint Committee IABSE-CEB-FIP-ECCS. Model for Composite Structures[S]. London: Construction Press, 1981.

[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.

[11] Nelson Stud Welding Company. Nelson stud welding "Concrete anchor test No. 7", project number 802 [R]. Lorain: Nelson stud welding company, 1966.

[12] Ohtani Y, Fukumoto Y. Failure behavior of stud anchor due to pullout tension [R]. Osaka: Technology Reports of the Osaka University, 1989.

[13] Al-Ta'an S A, Mohammed A A. Tensile strength of short headed anchors embedded in steel fibrous concrete [J]. Al-Rafidain Engineering Journal, 2010, 18: 35.

[14] Collins D M, Klinger R E, Polyzois D. Load-deflection Behaviour of Cast-in-Place and Retrofit Concrete Anchors Subjected to Static, Fatigue, and Impact Tensile Loads [R]. Austin: The University of Texas at Austin, 1989.

[15] Ashour A F, Alqedra M A. Concrete breakout strength of single anchors in tension using neural networks [J]. Advances in Engineering Software, 2005, 36(2):87.

[16] Piccinin R, Ballarini R, Cattaneo S. Linear elastic fracture mechanics pullout analyses of headed anchors in stressed concrete [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2010, 136(6): 761.

[17] Anderson N S, Meinheit D F. A review of headed-stud design criteria in the six edition of the PCI design handbook [J]. PCI Journal, 2007, 52(1):1.

[18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T10433—2002 电弧螺柱焊用圆柱头焊钉[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of P R China. GB/T 10433—2002 Cheese head studs for arc stud welding [S]. Beijing: China Standards Press, 2003.