

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.051

Q690 钢-高强螺栓承压型抗剪连接试验

李静尧^{1a,1b}, 聂诗东^{1a,1b}, 曾佳², 戴国欣^{1a,1b}

(1.重庆大学 a.土木工程学院;b.山地城镇建设与新技术教育部重点实验室,重庆 400045;

2.中国建筑西南设计研究院有限公司,成都 610093)

摘要:对 32 组 Q690 高强钢-高强螺栓(10.9 级或 12.9 级)抗剪连接进行试验,观察到连接钢板的剪出破坏、撕裂破坏、承压破坏、净截面破坏和螺栓剪切破坏共 5 种破坏模式。通过分析试验数据,发现 Q690 高强钢有良好的局部变形能力,研究了螺栓等级、规格、预拉力和端距、边距对试件承载力和变形的影响。收集了多篇文献中的试验数据,得到剪出破坏、撕裂破坏的几何界限约为 $(0.7\sim 0.9)e_1/e_2$,净截面破坏试件的应力比均大于 1.0。

关键词:Q690 钢;高强钢;高强螺栓;承压型连接;抗剪连接

中图分类号:TU391

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2022)07-024-13

Experimental study on Q690 steel-highstrength bolts bearing-type shear connection

LI Jingyao^{1a,1b}, NIE Shidong^{1a,1b}, ZENG Jia², DAI Guoxin^{1a,1b}

(1a. School of Civil Engineering; 1b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. China Southwest Architectural Design and Research Institute Corp., Ltd., Chengdu 610093, P. R. China)

Abstract: Bearing-type shear connection of 32 sets of Q690 steel-highstrength bolts (property grade 10.9 or 12.9) were studied through experiments. Tear-out failure, splitting failure, bearing failure, net cross section failure, and bolt shear failure were observed. Through the analysis of the test data, it is found that Q690 highstrength steel had good local deformation ability. Furthermore, the effects of bolt grade, size, pretension, end distance, and edge distance on the bearing capacity and deformation of the specimen were studied. The experimental data in several papers were collected and analyzed, showing that the geometric limit between the tear-out failure and splitting failure was about from $0.7e_1/e_2$ to $0.9e_1/e_2$, and the stress ratio of the net section failure specimen was greater than 1.0.

Keywords: Q690 steel; highstrength steel; highstrength bolt; bearing-type connection; shear connection

随着高强钢在建筑工程中的大量应用,高强钢-高强螺栓抗剪连接的研究越来越深入。现有研究主要集中在高强钢-高强螺栓连接构造、受力性能和承载力等方面。Chen 等^[1]开展了 460 MPa 和 890 MPa 高强钢

收稿日期:2019-09-16 网络出版日期:2019-11-04

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51578089)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51578089).

作者简介:李静尧(1992—),男,硕士研究生,主要从事钢结构研究,(E-mail)li.jingyao@cqu.edu.cn。

通信作者:聂诗东,男,博士,副教授,博士生导师,主要从事钢结构研究,(E-mail)nieshidong@cqu.edu.cn。

双剪连接试验,发现钢材强度对破坏模式有较大影响,建议调整构造要求充分发挥高强钢的优势。Puthli 等^[2]研究了边距和中距对 S460 板承压强度的影响,认为应放宽欧洲钢结构设计规范中对中距和边距的限值。Wang 等^[3]通过 550 MPa、690 MPa、890 MPa 高强钢单颗螺栓双剪连接拉伸试验,研究了端距、边距、钢材强度等级对抗剪连接破坏模式、承载力、峰值位移的影响。郭宏超等^[4]研究了高强钢材料强度和螺栓布置方式对连接承载力和变形的影响,认为螺栓预拉力对抗剪强度和变形没有影响。Winter^[5]将螺栓抗剪连接的破坏模式归纳为以下 4 种:端部撕裂、孔壁承压破坏、净截面拉断和螺栓剪断。石永久等^[6]通过 9 组 Q460 高强钢双剪连接试验发现,欧洲钢结构规范和美国规范都不能较好地预测其破坏模式和极限承载力。Može 等^[7]对带孔 S690 钢板的拉伸试验表明,所有的净截面破坏都是延性的,综合 Kim、Rex 和 Puthli 的试验数据给出了发生承压破坏与净截面破坏的端距与边距比值的界限值^[2, 8-10]。Wang 等^[3]基于 Rex^[10]、Može^[7, 9]的试验数据和欧洲钢结构规范背景文件中的试验数据线性回归了试件剪出破坏承载力、撕裂破坏承载力与端距的关系,给出了发生剪出破坏和撕裂破坏的端距与边距比值的界限值(该界限值与钢材的屈强比有关)。有学者对滑移系数与钢材强度的关系^[11]、长连接时钢材的局部变形能力^[12]、块剪破坏^[13]、带填板的双剪连接^[14]等进行研究。

目前,高强钢-高强螺栓抗剪连接的研究对象集中于双剪连接,钢材主要为国产 Q460、欧洲 S690 高强钢材,螺栓主要为 8.8 级和 10.9 级高强螺栓,少有更高等级高强钢-高强螺栓抗剪连接的相关研究成果。大多数的高强螺栓抗剪连接研究中未施加螺栓预拉力,缺乏预拉力对高强螺栓抗剪连接承载力、变形的研究。文中通过国产 690 MPa 级高强钢—10.9 级、12.9 级高强螺栓抗剪连接试验,分析了螺栓、预拉力和连接构造对承压型抗剪连接承载力和变形的影响,考虑 Q690 高强钢的局部变形能力,并对剪出破坏和撕裂破坏模式的几何界限进行讨论。

1 试验概况

1.1 试件设计

试件设计主要考虑了螺栓强度等级、螺栓布置形式、螺栓直径、有无预拉力以及试验板几何尺寸的影响,几何尺寸包括端距、边距和中距。设计了 32 组双剪切面试件,其中,25 组 Q690+12.9M20 试件,3 组 Q690+10.9M20 试件,4 组 Q690+10.9M16 试件。试件由试验板、盖板、高强螺栓和夹板组成,同一试件的试验板和盖板采用相同的几何尺寸(端距、边距、中距),如图 1 所示,螺栓的布置形式包括单颗螺栓、两颗螺栓纵向布置、两颗螺栓横向布置 3 类布置形式,分别以字母“A”、“B”和“C”表示。试件试验板实际尺寸如表 1 所示,试件编号中“n”表示不施加预拉力。为了便于观察试件破坏之后试验板的局部变形,在试验板与盖板的接触面上绘制了 1 cm×1 cm 的网格。

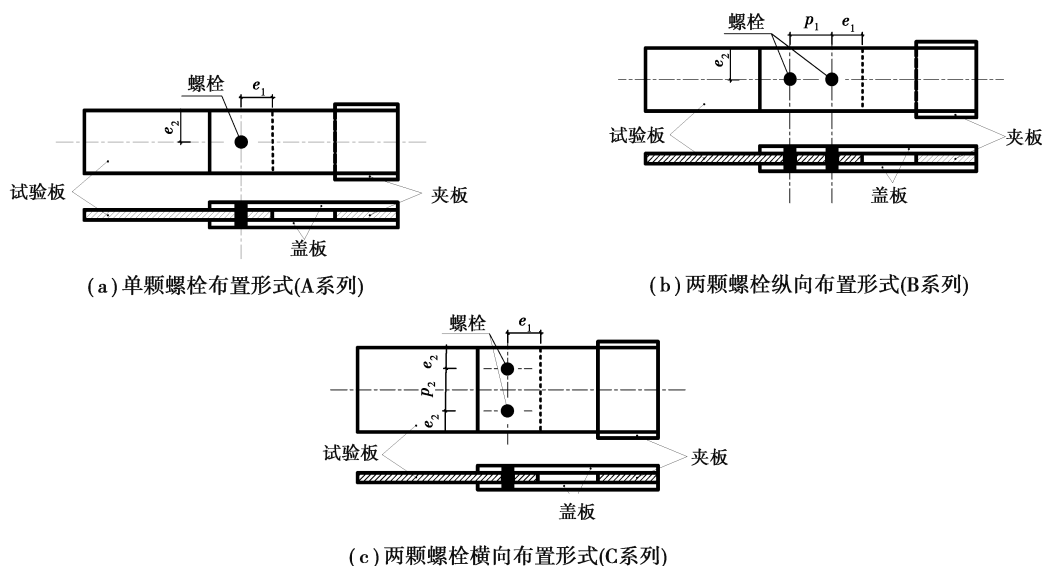


图 1 抗剪连接试件示意图

Fig. 1 Shear connection specimens schematic

表 1 试验板实际尺寸

Table 1 Actual dimensions of test plates

mm

试件编号	试验板宽度 b	试验板厚度 t	孔径 d_0	端距 e_1	边距 e_2	中距 p_1	中距 p_2
A-12.9-1	79.05	13.60	22.02	54.40	40.76	—	—
A-12.9-2	98.37	13.66	22.05	51.77	49.09	—	—
A-12.9-2n	98.56	13.50	22.20	49.49	49.35	—	—
A-12.9-3	118.04	13.50	22.06	58.73	58.98	—	—
A-12.9-4	100.36	13.65	22.06	31.57	50.14	—	—
A-12.9-5	100.51	13.64	21.92	41.86	50.23	—	—
A-12.9-6	99.35	13.76	22.07	62.23	49.57	—	—
A-12.9-7	100.64	13.67	22.09	71.46	50.11	—	—
A-12.9-8	99.42	9.56	22.24	49.21	49.49	—	—
A-12.9-8n	101.04	9.54	22.23	49.92	50.38	—	—
B-12.9-1	82.72	13.63	22.18	52.85	41.41	68.74	—
B-12.9-2	98.36	13.69	22.12	51.93	49.07	72.17	—
B-12.9-3	116.90	13.53	22.35	52.81	58.32	69.35	—
B-12.9-3n	123.15	13.47	22.42	49.47	61.59	70.36	—
B-12.9-4	100.36	13.75	22.07	51.83	50.13	51.80	—
B-12.9-7	120.78	9.63	22.33	49.76	60.34	70.09	—
B-12.9-7n	119.30	9.74	22.43	49.41	59.53	69.44	—
C-12.9-1	100.38	13.70	22.16	51.37	25.43	—	49.69
C-12.9-2	114.05	13.63	22.09	51.23	28.95	—	58.61
C-12.9-3	138.62	13.77	21.96	51.24	33.67	—	71.49
C-12.9-3n	138.72	13.46	22.23	50.29	34.35	—	70.40
C-12.9-4	138.27	13.57	22.05	30.58	34.04	—	69.91
C-12.9-5	140.07	13.69	22.02	40.24	34.92	—	70.21
C-12.9-8	139.86	9.57	22.08	49.94	34.92	—	69.93
C-12.9-8n	139.98	9.48	22.11	50.88	35.07	—	70.09
A-10.9-1	100.23	13.66	17.92	51.82	50.06	—	—
A-10.9-2	101.00	13.66	22.16	52.74	50.47	—	—
B-10.9-1	100.82	13.67	17.97	41.26	50.43	62.06	—
C-10.9-1	118.24	13.65	17.71	41.35	28.00	—	61.88
C-10.9-2	137.25	13.44	17.67	41.84	33.06	—	70.42
C-10.9-3	119.43	13.64	22.21	51.96	28.85	—	60.86
C-10.9-4	141.13	13.80	22.06	52.55	34.96	—	71.42

1.2 材料性能试验

试件所用钢材和高强螺栓的材料性能,如表 2 和表 3 所示,表中 f_y 和 f_u 分别为钢材的屈服强度和抗拉强度; f_y^b 和 f_u^b 分别为螺栓的屈服强度和抗拉强度。

表 2 Q690 钢材料力学性能试验结果
Table 2 Mechanical properties of Q690 steel

厚度/mm	f_y /MPa	f_u /MPa	峰值应变/%	屈强比	伸长率/%
10	783.93	821.04	7.05	0.95	20.36
14	774.90	815.78	5.02	0.95	21.12

表 3 高强螺栓材料力学性能试验结果
Table 3 Mechanical properties of high strength bolts

螺栓规格	f_y^b /MPa	f_u^b /MPa	峰值应变/%	屈强比	伸长率/%
10.9M16×70	1 066.9	1 136.2	3.80	0.939	15.7
10.9M16×75	1 054.5	1 113.4	4.07	0.947	15.3
10.9M20×70	1 152.6	1 188.3	4.08	0.970	13.0
10.9M20×80	1 152.2	1 183.2	3.42	0.974	14.0
12.9M20×70	1 347.6	1 450.2	4.51	0.929	12.0
12.9M20×75	1 355.3	1 455.9	4.86	0.931	12.6

1.3 高强螺栓副扭矩系数

为了准确对螺栓施加预拉力,测定了采用的 6 种规格高强螺栓扭矩系数。各批次高强螺栓的扭矩系数平均值及标准差如表 4 所示,各组扭矩系数平均值为 0.110~0.150,扭矩系数标准差小于 0.01,满足《钢结构用高强度大六角头螺栓、大六角头螺母、垫圈技术条件》(GB/T 1231—2006)规范要求。

表 4 螺栓实测扭矩系数和施工预拉力
Table 4 Measured torque coefficient and construction pretension of high strength bolts

高强螺栓规格	扭矩系数	标准差	螺栓预拉力值/kN	施工预拉力/kN	施工扭矩/(N·m)
12.9-M20×70	0.132 5	0.003 2	185	208	550
12.9-M20×75	0.129 2	0.002 6	185	203	525
10.9-M20×70	0.141 5	0.004 7	155	168	475
10.9-M20×80	0.128 3	0.007 6	155	175	450
10.9-M16×70	0.148 7	0.009 3	100	116	275
10.9-M16×75	0.141 8	0.008 5	100	110	250

1.4 试验装置与加载制度

试验在 1 000 kN 万能试验机上进行,加载装置和测点布置如图 2 所示,在试件两侧各布置 1 个量程为 50 mm 的位移计,在试验机下夹具与试件上测量点之间布置位移计,以监测夹具与板件之间的滑移。万能试验机施加的拉力由试验机的力传感器记录,位移计和应变片数据由 DH3816 N 采集仪记录。

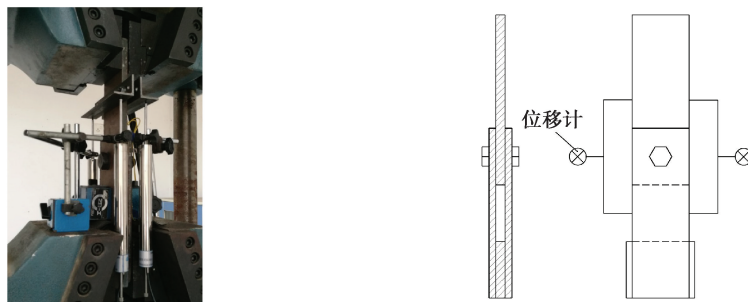


图 2 加载装置和测点布置图

Fig. 2 Loading device and measuring point

2 试验结果

2.1 破坏模式

试验中观察到钢板剪出破坏、撕裂破坏、承压破坏、净截面破坏和螺栓剪切破坏共 5 种破坏模式。试验板发生剪切破坏时,螺栓向前挤压钢板,螺栓孔被拉长直至破坏,可明显观察到试验板上的剪切线和螺栓孔前的“剪出块”,如图 3(a)所示;试验板发生撕裂破坏时,试验板的螺栓孔正前方板件边缘被撕裂,裂缝从试验板边缘斜向发展至被拉长螺栓孔的一侧,如图 3(b)所示;发生承压破坏的试件仅观察到螺栓孔被拉长的现象,如图 3(c)所示;在净截面破坏的试件中,可以观察到试件削弱截面有较明显“颈缩”现象,如图 3(d)所示;发生螺栓剪切破坏的试件,螺杆沿剪切面被光滑剪断,破坏时螺栓孔变形较小,如图 3(e)所示。各破坏模式对应数量,如表 5 所示,试验中存在个别混合态破坏的试件,统计时以最终的破坏模式统计。

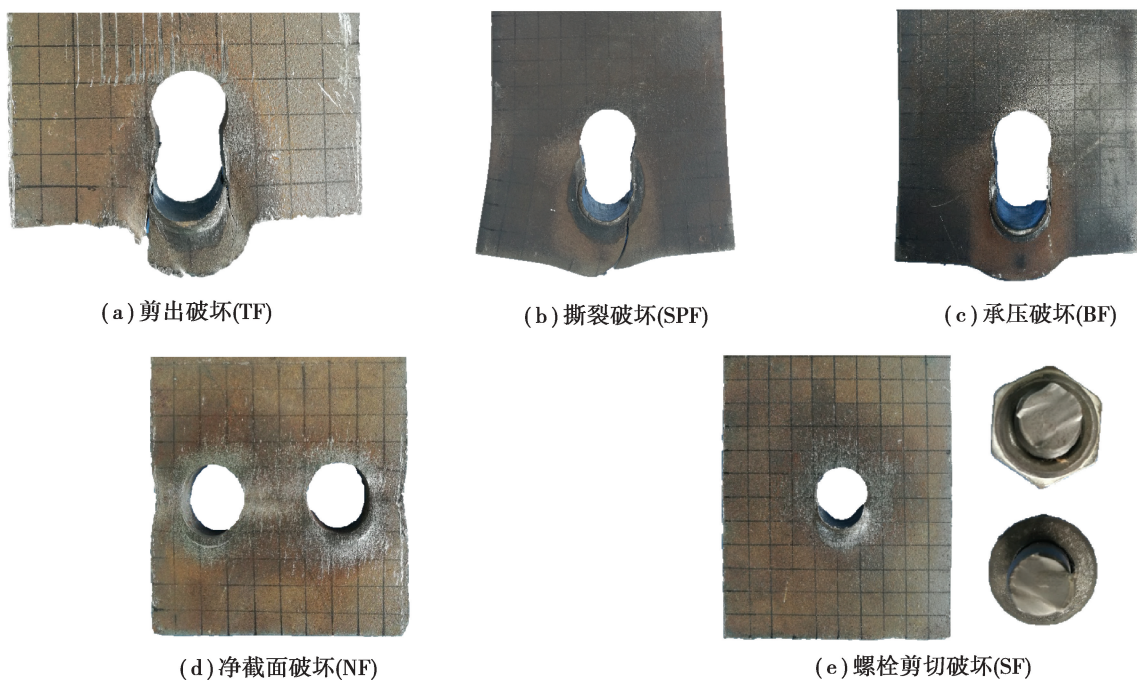


图 3 破坏模式

Fig. 3 Failure modes

表 5 试件破坏模式统计
Table 5 Statistics of failure mode

试件		TF	SPF	BF	NF	SF	合计
螺栓等级	螺栓直径						
12.9	M20	3	7	1	5	9	25
10.9	M20	0	0	0	0	3	3
	M16	0	0	0	0	4	4

2.2 抗剪连接试验结果

抗剪连接试件的极限承载力和变形如表 6 所示, P_c 是施工预拉力, F_s 是滑移荷载, Δ_s 是滑移位移, F_u 是极限承载力, Δ_p 是峰值位移。滑移位移取值原则:对于有螺栓预拉力试件,取试件滑移前后的位移差;对于无预拉力试件,取试件受荷后,对应荷载为 10 kN 时的位移。文中峰值位移和极限位移已扣除了滑移位移。

表 6 试验结果
Table 6 Test results

试件编号	P_c /kN	F_s /kN	Δ_s /mm	F_u /kN	破坏模式	Δ_p /mm
A-12.9-1	203	189.7	2.72	480.5	SF	5.67
A-12.9-2	203	194.5	2.98	501.0	SF	6.12
A-12.9-2n	0	—	3.58	496.0	BF	13.74
A-12.9-3	203	203.6	2.81	499.5	SF	5.62
A-12.9-4	203	192.6	1.54	380.6	TF	6.08
A-12.9-5	203	201.6	3.40	476.5	TF	8.19
A-12.9-6	203	186.8	2.37	481.5	SF	6.30
A-12.9-7	203	194.2	2.94	484.5	SF	6.16
A-12.9-8	208	193.8	1.78	370.8	SPF	12.80
A-12.9-8n	0	—	3.78	366.0	SPF	15.70
B-12.9-1	203	414.6	2.26	736.0	NF	6.96
B-12.9-2	203	401.8	0.90	882.0	NF	9.40
B-12.9-3	203	418.5	1.90	943.0	SF	6.18
B-12.9-3n	0	—	2.48	822.0	SF	4.32
B-12.9-4	203	392.8	1.62	896.0	NF	11.64
B-12.9-7	208	441.0	2.12	740.0	SPF	14.84
B-12.9-7n	0	—	3.51	730.5	SPF	16.55
C-12.9-1	203	386.8	3.29	725.0	NF	7.41
C-12.9-2	203	394.2	1.79	813.0	NF	6.33

续表6

试件编号	P_c/kN	F_s/kN	Δ_s/mm	F_u/kN	破坏模式	Δ_p/mm
C-12.9-3	203	393.5	2.52	952.0	SF	5.23
C-12.9-3n	0	—	3.83	846.0	SF	4.70
C-12.9-4	203	378.6	2.21	745.0	TF	7.69
C-12.9-5	203	399.2	2.58	927.0	SPF	9.27
C-12.9-8	208	370.0	1.46	753.5	SPF	10.62
C-12.9-8n	0	—	3.80	714.5	SPF	13.54
A-10.9-1	110	116.8	2.07	272.6	SF	5.38
A-10.9-2	168	177.8	2.07	413.8	SF	5.85
B-10.9-1	110	249.2	1.74	514.5	SF	4.78
C-10.9-1	110	229.7	0.00	544.0	SF	4.49
C-10.9-2	110	237.6	0.98	546.5	SF	4.64
C-10.9-3	168	349.2	3.14	790.0	SF	5.56
C-10.9-4	168	340.4	1.06	776.0	SF	5.06

3 试验结果分析

3.1 Q690 钢材料

钢材的变形能力对高强钢-高强螺栓连接有重要影响,承压型抗剪连接是通过螺栓与孔壁的承压接触传递荷载,螺栓孔导致的板材净截面削弱和加载初期螺栓与孔壁之间的挤压会产生较大的应力集中,钢材很快进入塑性,如果钢材有较高延性,就能够有效地进行应力重分布,提高连接的极限承载力。图 4 展示了 3 种螺栓布置形式下发生承压破坏试验板的变形,3 个试件的端距相近,破坏形态也相近,均是最外侧螺栓孔挤压变形,端部发生撕裂破坏造成试件失效。表 7 给出了部分撕裂破坏试件的承载力和变形。由表可知,B 系列试件与 C 系列试件的承载力相近,是 A 系列试件的 2 倍;B 系列试件的失效方式与 A 系列、C 系列失效方式相同,认为 B 系列试件破坏时,里侧螺栓孔壁与外侧螺栓孔壁贡献了相同的承压承载力,里侧螺栓孔处的钢板变形能满足外侧螺栓孔破坏时的位移需求,认为试验采用的 Q690 高强钢材局部变形能力良好,应用于两颗螺栓沿受力方向布置的双剪连接中能较好地实现内力的重分布。

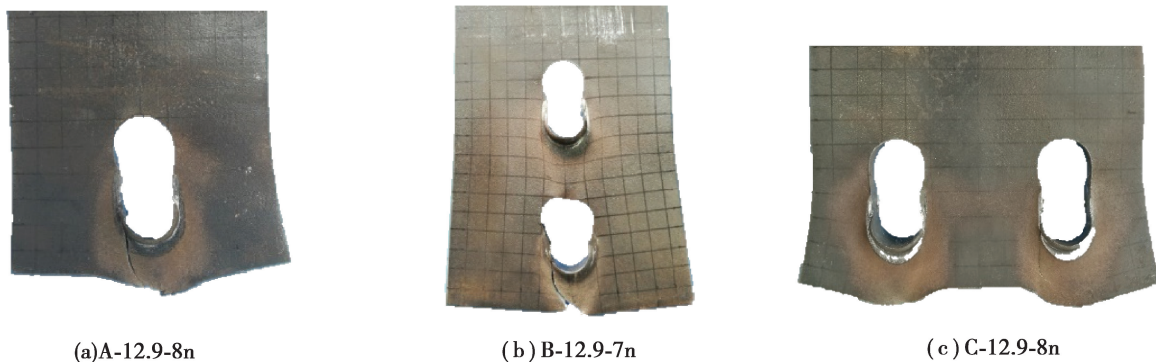


图 4 不同螺栓布置形式的试验板变形图

Fig. 4 The deformation diagram of test plates with different bolt arrangement

表 7 不同螺栓布置形式试件的承载力和变形比较

Table 7 Comparison of load and deformation of specimens with different arrangements

试件编号	e_1/mm	t/mm	破坏模式	F_u/kN	$F_u/F_{u,A}$	Δ_p/mm
A-12.9-8	49.21	9.56		370.8	—	12.80
B-12.9-7	49.76	9.63	SPF	740.0	2.00	14.84
C-12.9-8	49.94	9.57		753.5	2.03	10.62
A-12.9-8n	49.92	9.54		366.0	—	15.70
B-12.9-7n	49.41	9.74	SPF	730.5	2.00	16.55
C-12.9-8n	50.88	9.48		714.5	1.95	13.54

3.2 高强螺栓

3.2.1 螺栓等级和规格的影响

由表 6 可知,配置 12.9 级螺栓试件的破坏模式差异较大,配置 10.9 级螺栓的试件均发生了螺栓剪切破坏。表 8 中列出了满足《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)《端距、边距和中距的要求而螺栓不同的对比试件。由表 8 可知,发生螺栓剪切破坏的试件,其承载力与螺栓直径和螺栓强度等级正相关;试件的变形能力和承载力正相关,其变形能力与螺栓直径和螺栓强度等级正相关。

表 8 配置不同螺栓试件发生剪切破坏的承载力和变形

Table 8 Bearing capacity of specimens with bolt shear failure

试件编号	螺栓	破坏模式	F_u/kN	Δ_p/mm	f_u^b/MPa
A-12.9-2	12.9M20		501.0	6.12	1 450.2
A-10.9-2	10.9M20	SF	413.8	5.85	1 188.3
A-10.9-1	10.9M16		272.6	5.38	1 136.2
C-12.9-3	12.9M20		952.0	5.23	1 450.2
C-10.9-4	10.9M20	SF	776.0	5.06	1 188.3
C-10.9-2	10.9M16		546.5	4.64	1 136.2

3.2.2 预拉力影响

图 5 展示了预拉力在螺栓剪切破坏和撕裂破坏模式下对试件承载力的影响,可以看出,预拉力对发生螺栓剪切破坏的试件承载力有明显提升,B 系列试件和 C 系列试件承载力提升为滑移荷载的 14.7% 和 12.5%;而对发生钢板撕裂破坏的试件影响并不明显,原因在于发生撕裂破坏的试件临近破坏时,有预拉力试件的盖板和试验板之间的摩擦力已经很小,可以忽略螺栓预拉力对撕裂破坏试件极限承载力的影响。图 6 显示了预拉力对撕裂破坏和螺栓剪切破坏试件变形能力的影响,可以看出,施加预拉力会使发生撕裂破坏的试件峰值位移变小,发生螺栓剪切破坏的试件峰值位移增大。实际上,试验滑移位移的取值原则将导致有预拉力试件的峰值位移偏小。有螺栓预拉力试件滑移之后,螺栓杆与孔壁的冲击产生了一定的螺栓孔变形,而按照上述取值原则得到有螺栓预拉力试件的滑移位移实际上已包含了这部分变形,文中给出的有螺栓预拉力试件的峰值位移偏低。对于发生螺栓剪切破坏的试件,预拉力提高了试件的承载力,而承载力越大,螺栓孔的变形也越大,造成了有螺栓预拉力试件的峰值位移比无螺栓预拉力试件的峰值位移更大的现象。

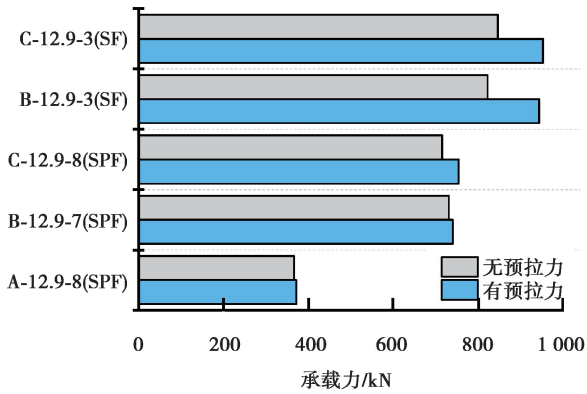


图 5 预拉力对不同破坏模式试件承载力的影响

Fig. 5 Effect of pretension on the bearing capacity of specimens with different failure modes

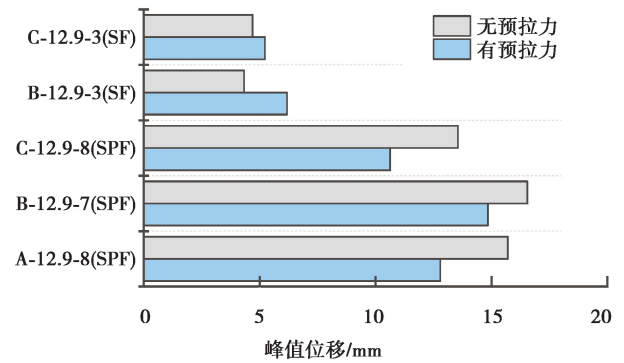


图 6 预拉力对不同破坏模式试件变形的影响

Fig. 6 Effect of pretension on the deformation of specimens with different failure modes

3.3 连接构造

3.3.1 螺栓布置形式的影响

表 9 列举了不同螺栓布置形式下发生不同破坏模式试件的承载力和峰值位移,表中, $F_{u,A}$ 代表对应 A 系列试件的承载力。对于发生撕裂破坏的试件,同一组内 3 个试件的端距相近,B 系列试件与 C 系列试件的承载力差异不大,偏差最大为 2.2%,且均为 A 系列试件极限承载力的 2 倍,即螺栓布置形式对两颗螺栓抗剪连接试件的承压承载力影响不大。对于螺栓剪切破坏的试件,试件 B-10.9-1 的承载力比试件 A-10.9-1 承载力的 2 倍小 5.6%,比试件 C-10.9-3 的承载力小 5.9%。而采用 12.9 级高强螺栓的试件中,B 系列试件比 C 系列试件的承载力略小 2%。这主要是螺栓与钢材的级配引起的,在螺栓沿受力方向(纵向)布置的抗剪连接中,螺栓较弱而钢板较强时,螺栓孔的变形较小导致螺栓受力不均匀。所以,螺栓抗剪承载力与连接承压承载力相差较大时,多颗螺栓连接节点中螺栓受力不均匀,降低连接的抗剪承载力。对试件的变形影响方面,B 系列试件都比 C 系列试件的位移大,且大于 A 系列试件的位移。沿受力方向布置螺栓的抗剪连接比垂直受力方向布置螺栓的连接变形大。

表 9 不同螺栓布置形式试件的承载力和变形比较

Table 9 Comparison of load and deformation of specimens with different arrangements

试件编号	e_1/mm	破坏模式	F_u/kN	Δ_p/mm	$F_u/F_{u,A}$
A-12.9-8	49.21		370.8	12.80	—
B-12.9-7	49.76	SPF	740.0	14.84	2.00
C-12.9-8	49.94		753.5	10.62	2.03
A-12.9-8n	49.92		366.0	15.70	—
B-12.9-7n	49.41	SPF	730.5	16.55	2.00
C-12.9-8n	50.88		714.5	13.54	1.95
A-10.9-1	51.82		272.6	5.38	—
B-10.9-1	41.26	SF	514.5	4.78	1.89
C-10.9-2	41.84		546.5	4.64	2.00
A-12.9-1	51.77		480.5	5.67	—
B-12.9-3	52.81	SF	943.0	6.18	1.96
C-12.9-3	51.24		952.0	5.23	1.98

3.3.2 端距和边距的影响

为了方便分析,将承载力无量纲化为

$$\alpha_b = \frac{F_u}{f_u dt}, \tag{1}$$

$$\alpha_n = \frac{F_u}{A_n f_u}, \tag{2}$$

$$\alpha_s = \frac{F_u}{A f_u^b}, \tag{3}$$

式中: F_u 是试件承载力; f_u 是钢材抗拉强度; t 是试验板厚度; d 是螺栓公称直径; A_n 是试件削弱截面的截面积; A 是螺栓的受剪截面积,当剪切面经过螺纹段时,取螺栓的有效截面积 A_e 。

图 7、图 8 分别展示了试件承载力与端距、边距的变化关系,连线表示仅端距变化的点。端距和边距对试件变形的影响,如图 9 和图 10 所示。在承载力影响方面,如图 7(a)所示,对剪出破坏和撕裂破坏试件,在试验的端距范围内,随着端距的增大,试件的破坏模式由剪出破坏向撕裂破坏过渡,承压应力比线性增长。图 8(a)表明,在试验的边距范围内,承压应力比与边距无明显的相关关系。发生净截面破坏的试件的净截面应力比分布均在 1.00~1.10,如图 7(b)和图 8(b)所示,试件的承载力与端距无相关关系;但根据式(2)计算净截面应力比时,包含了边距的影响,说明其承载力与边距有明显的正相关关系。如图 7(c)和图 8(c)所示,发生螺栓剪切破坏的试件的螺栓剪切应力比大都大于 $1/\sqrt{3}$,即 0.577,与端距、边距均未呈现明显的相关关系。

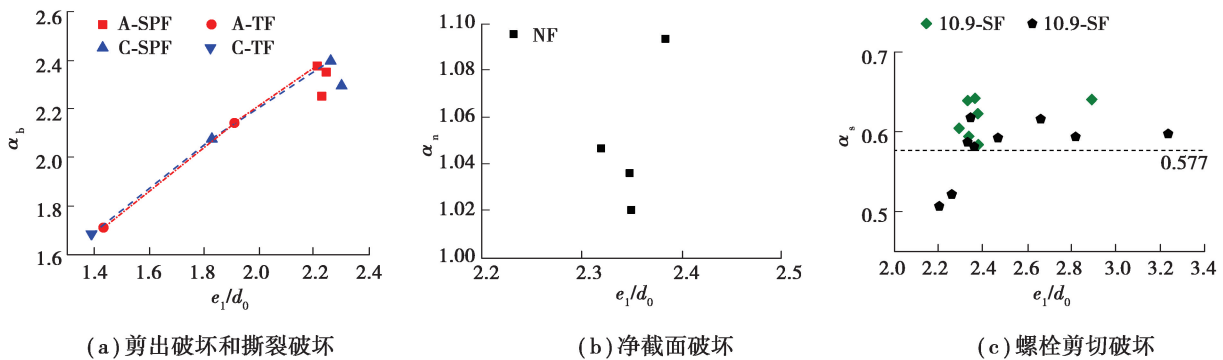


图 7 端距对试件承载力的影响

Fig. 7 Effect of end distance on bearing capacity of specimens

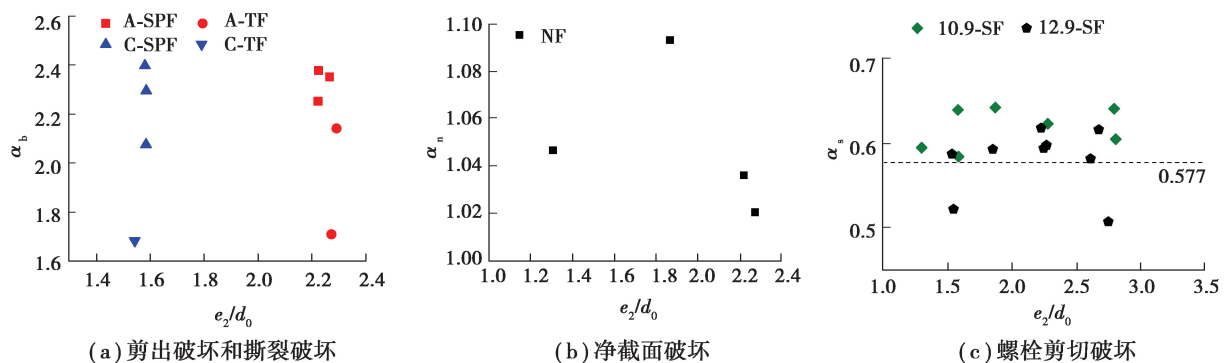


图 8 边距对试件承载力的影响

Fig. 8 Effect of edge distance on bearing capacity of specimens

在变形影响方面,如图 9(a)和图 10(a)所示,对发生剪出破坏和撕裂破坏的试件,随着端距增大,试件的峰值位移不断增加,表明发生撕裂破坏的试件较发生剪出破坏的试件有更好的延性;而未见变形与边距有明

显相关关系。当端距较大时,发生撕裂破坏试件的承压变形伴随着一定的钢板拉伸塑性变形,出现了试件变形增加较快的现象。试件发生净截面破坏的位移如图 9(b)和图 10(b)所示,端距变化范围不大,但峰值位移波动较大,这主要是净截面破坏时试件的螺栓孔变形引起的。图 10(b)中连线表示配置有相同螺栓,可以看出,试件的峰值位移随边距增大而增大。如图 9(c)和图 10(c)所示,发生螺栓剪切破坏试件的变形与端距和边距均无明显关系,这是由于发生螺栓剪切破坏的试件变形主要来自螺栓孔的挤压变形,挤压变形大小与螺栓抗剪极限承载力相关,即与螺栓规格和等级相关,而与试验板几何尺寸无关。

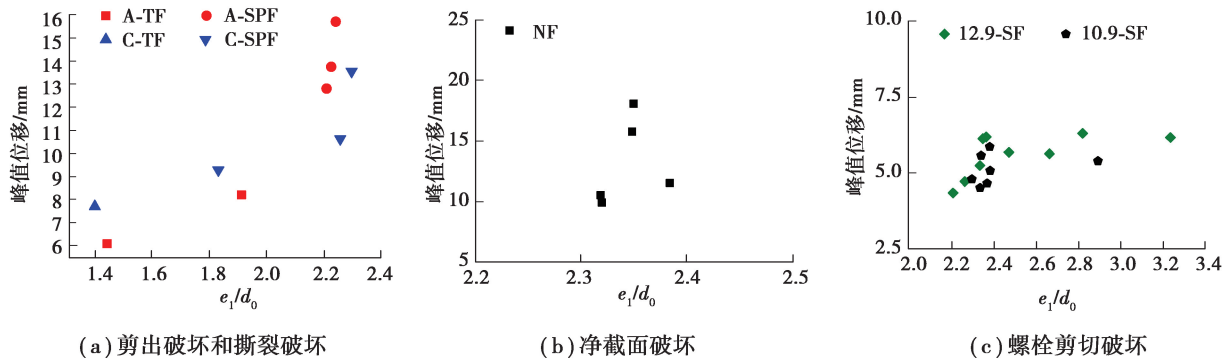


图 9 端距对试件变形的影响

Fig. 9 Effect of end distance on deformation of specimens

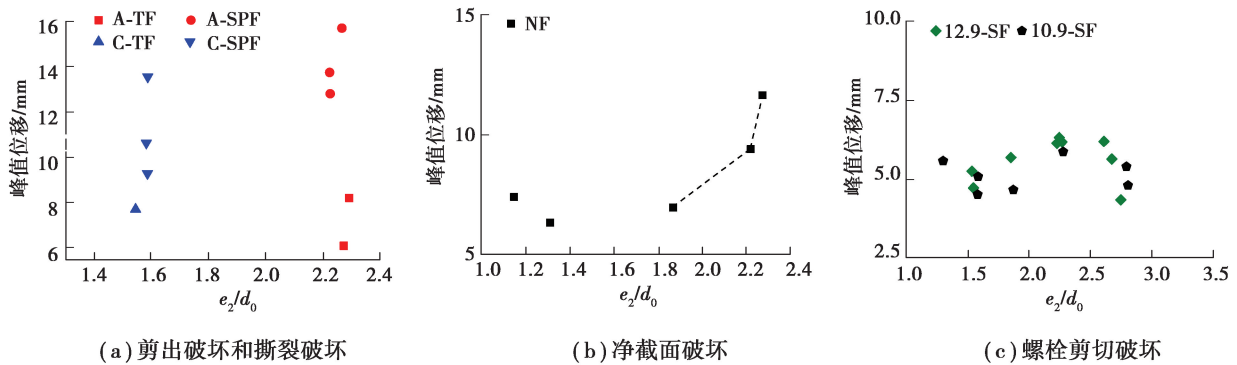


图 10 边距对试件变形的影响

Fig. 10 Effect of edge distance on deformation of specimens

4 破坏模式几何界限分析

试验中存在混合破坏形态的试件,部分撕裂破坏试件伴随着钢板拉伸变形,部分净截面破坏试件伴随着螺栓孔的变形。文献[3]认为在保证螺栓可靠的情况下,破坏模式与钢材的强度等级无关;文中对预拉力影响分析认为,可以忽略螺栓预拉力对剪出破坏、撕裂破坏试件极限承载力的影响。为了研究剪出破坏、撕裂破坏和净截面破坏发生的几何尺寸界限,收集多篇文献[2, 3, 6, 9, 15]中单一破坏类型的试验数据,按净截面应力比统一绘制于图 11 中。可以看出,撕裂破坏、剪切破坏和净截面破坏有较明显的破坏界限。随着 e_1/e_2 的增大,剪出破坏向撕裂破坏和承压破坏过渡,两者的界限范围为 $(0.7 \sim 0.9)e_1/e_2$;当净截面应力比 α_n 达到 1 时,试件的破坏形态转变为净截面破坏,在此之后,随着 e_1/e_2 的增大,净截面应力比不再增加;在统计的试验数据范围内,承压破坏试件分布在 $e_1/e_2 = 1$ 附近。

撕裂破坏和剪出破坏均有较强的线性关系,B 系列撕裂破坏试件数据与 A、C 系列的偏差较大。通过线性回归得到了 A、C 2 个系列撕裂破坏和剪出破坏净截面应力比与 e_1/e_2 的关系,当应力比 $\alpha_n = 1$ 的时候,剪

出破坏和撕裂破坏的 e_1/e_2 分别为 1.43 和 1.45, 相差较小, 即认为 A、C 系列试件 e_1/e_2 大于 1.43 时, 更可能发生净截面破坏, 而小于 1.43 时, 更倾向于发生撕裂破坏。

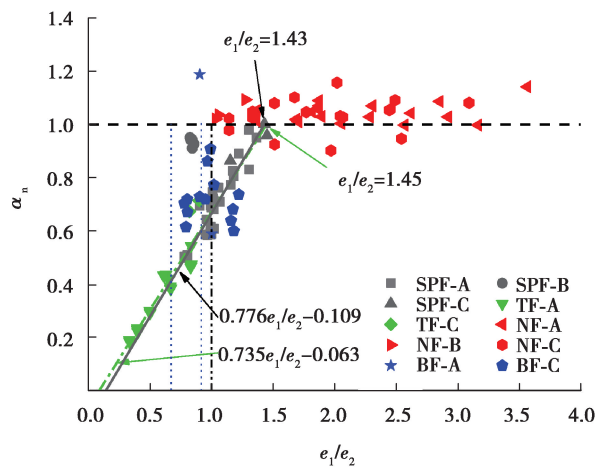


图 11 端距边距比对破坏模式的影响

Fig. 11 Effect of the ratio of end-to-edge distance on the failure modes

5 结 论

1) 高强钢抗剪连接的可能破坏模式包括剪出破坏、撕裂破坏、承压破坏、净截面破坏和螺栓剪切破坏 5 种。随着端距增大, 破坏模式由剪出破坏向撕裂破坏过渡, 发生撕裂破坏的试件较剪出破坏的试件拥有更好的延性和更高的承压承载能力; 发生净截面破坏试件的承载力与边距成正相关关系; 未见螺栓剪切破坏与端距、边距有明显相关性。

2) Q690 钢具有良好的局部变形能力, 应用在两颗螺栓纵向布置的双剪连接中, 能较好地实现内力重分布, 使得各螺栓受力均匀。

3) 螺栓规格对抗剪连接的破坏模式有很大影响, 高强螺栓与钢材级配不当会降低螺栓的抗剪承载力。纵向布置螺栓的抗剪连接形式可以增大连接的峰值位移, 提高螺栓连接延性。

4) 对发生螺栓剪切破坏的试件, 螺栓预拉力的施加增大了试件极限承载力和峰值位移, 但对发生撕裂破坏试件的极限承载力影响不大。

5) 发生剪出破坏和撕裂破坏的试件, 净截面应力比 α_n 与端距边距比 e_1/e_2 有明显相关关系, 且 2 种破坏模式的回归曲线差别较小, 2 种破坏模式的界限范围为 $(0.7 \sim 0.9)e_1/e_2$, 绝大部分净截面破坏类型的试件, 应力比大于 1.0。

参考文献:

- [1] Chen Y F, Shi G. Investigations on the behavior of high strength steel connections with grade 12.9 bolts [M]. 14th International Symposium on Structural Engineering (ISSE-14). Beijing: PEOPLES R CHINA, 2016.
- [2] Puthli R, Fleischer O. Investigations on bolted connections for high strength steel members[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2001, 57(3): 313-326.
- [3] Wang Y B, Lyu Y F, Li G Q, et al. Behavior of single bolt bearing on high strength steel plate[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 137: 19-30.
- [4] 郭宏超, 皇垚华, 刘云贺, 等. Q460 高强钢螺栓连接承载性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(3): 81-89.
Guo H C, Huang Y H, Liu Y H, et al. Experimental study on bearing capacity of Q460 high-strength steel bolted connections[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(3): 81-89.(in Chinese)
- [5] Winter G. Tests on bolted connections in light gage steel[J]. Journal of the Structural Division, 1956, 82(2): 25.

- [6] 石永久, 潘斌, 施刚, 等. 高强度钢材螺栓连接抗剪性能试验研究[J]. 工业建筑, 2012, 42(1): 56-61.
Shi Y J, Pan B, Shi G, et al. Experimental study on high strength steel-platebolted connections under shear force [J]. Industrial Construction, 2012, 42(1): 56-61.(in Chinese)
- [7] Može P, Beg D. A complete study of bearing stress in single bolt connections[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 95: 126-140.
- [8] Kim H J, Yura J A. The effect of ultimate-to-yield ratio on the bearing strength of bolted connections[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1999, 49(3): 255-269.
- [9] Može P, Beg D. High strength steel tension splices with one or two bolts[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(8/9): 1000-1010.
- [10] Rex C O, Easterling W S. Behavior and modeling of a bolt bearing on a single plate[J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(6): 792-800.
- [11] Cruz A, Simões R, Alves R. Slip factor in slip resistant joints with high strength steel[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 70: 280-288.
- [12] Može P, Beg D. Investigation of high strength steel connections with several bolts in double shear[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(3): 333-347.
- [13] Kouhi J. Strength test on bolted connections using high-strength steels (hss-steels) as a base material[J]. Rakenteiden Mekaniikka, 1992, 25: 41-53.
- [14] Dusicka P, Lewis G. High strength steel bolted connections with filler plates[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(1): 75-84.
- [15] 曾佳. Q690 高强钢-高强度螺栓抗剪连接受力性能试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
Zeng J. Experimental study on the mechanical behavior of Q690 high strength steel bolted connection[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)