

文章编号: 1000-4750(2015)Suppl-0314-08

复合材料胶栓混合连接机理的试验研究

赵馨怡¹, 黄盛楠², 冯 鹏¹, 李曙光³

(1. 清华大学土木工程系, 土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084;

2. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083; 3. 西安建筑科技大学土木学院, 西安 710055)

摘 要: 拉挤成型纤维复合材料在土木工程中应用广泛, 复合材料的连接问题是其结构设计的关键问题之一。目前复合材料的连接方式主要有胶接、螺栓连接和胶栓混接三种, 本文通过试验研究针对 FRP 的不同连接方式进行对比分析, 研究表明胶栓混合连接综合了胶接和螺栓连接的优点, 具有刚度大、延性好、应力分配合理等特点。该文还针对胶栓混合连接节点, 详细分析了端距、螺栓个数、搭接长度和螺栓直径等主要因素对其破坏模式、承载力的影响, 从而为 FRP 节点设计提供参考。

关键词: FRP; 连接; 试验; 胶栓混接; 胶结; 螺栓连接

中图分类号: TU38

文献标志码: A

doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.05.S060

EXPERIMENTAL RESEARCH ON HYBRID CONNECTING METHOD FOR FRP CONSTRUCTIONAL ELEMENTS

ZHAO Xin-yi¹, HUANG Sheng-nan², FENG Peng¹, LI Shu-guang³

(1. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of Ministry of Education,

Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084 China;

2. Civil and Environmental Engineering Institute, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

3. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Pultruded fibre reinforced plastics are widely used in civil engineering. The connection problem of composites is one of the key problems on the design of composite structures. There are three main connection methods for FRP: bonded connection, bolted connection and hybrid connection. In this paper, through the comparative analysis of these three connection methods, it can be seen clearly that because hybrid joints incorporate the advantages of the bonded and bolted connections, hybrid joints have larger stiffness, better ductility, and reasonable stress distribution. In addition, there is an increase in carrying capacity than that of bolted connections. Moreover, for a hybrid connection joint, the main influence factors are studied by experiments for its failure mode and carrying capacity, such as the end distance, the number of bolts, the lap length and the diameter of bolts.

Key words: FRP; connection; experiment; hybrid connection; bonded connection; bolted connection

由于 FRP 型材的优越性能, 已越来越多地用于民用基础设施建设, 但复合材料具有挤压屈服强度和抗剪强度较低、各向异性严重、韧性差、机械

连接较困难、缺口敏感度高、受铺层及环境的影响大等特点, 这些性能都是复合材料构件连接的限制因素^[1]。

收稿日期: 2014-05-16; 修改日期: 2015-03-24

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20110006120022)

通讯作者: 黄盛楠(1982—), 女, 天津人, 讲师, 博士, 主要从事结构工程领域的研究(E-mail: huangcn03@mails.tsinghua.edu.cn)。

作者简介: 赵馨怡(1993—), 女, 陕西人, 本科生, 主要从事结构工程领域的研究(E-mail: zhaoxy930715@163.com);

冯 鹏(1977—), 男, 陕西人, 教授, 博士, 主要从事新材料结构与新型结构的研究(E-mail: fengpeng@tsinghua.edu.cn);

李曙光(1987—), 男, 山东人, 硕士生, 主要从事结构工程领域的研究。

FRP 的连接问题最早出现于航空航天领域。据统计,在航空航天领域复合材料的破坏中 70%发生在连接部位,连接部位对复合材料结构的整体性有重要影响^[2-3]。在土木工程中复合材料的应用也遇到了同样的问题,但是土木工程中所用的主要为拉挤成型的复合材料,为了将 FRP 型材作为主要承力构件,FRP 型材之间的连接不可避免,连接部位一般成为整个结构的薄弱环节。

1 FRP 连接方法

复合材料的连接方式主要有螺栓(铆钉)连接、胶接连接和胶栓(铆)混合连接三种方式。根据连接形式又分为单搭接、双搭接、斜面搭接、阶梯型搭接等^[4-5],现在土木工程中最常用的是螺栓连接的单搭接形式。

螺栓连接是工程中比较实用的一种连接方法,国内外对螺栓连接的研究较多^[6-8]。对于胶接连接,在航空航天方面研究较多,而土木工程方面的研究及应用均较少。在胶栓混合连接方面的研究更少,但是从少量的试验研究结果及其与单一螺栓连接或胶接的对比来看,胶栓混接具有非常好的力学性能。Nguyen Duc Hai 等^[9]做了关于 CFRP/GFRP 混合的复合材料板的连接试验,提出了一种对拉挤成型复合材料构件非常有效的连接方法。

为了更进一步研究胶栓混合连接的受力特点,本文通过试验研究针对 FRP 的不同连接方式进行对比分析,并针对端距、螺栓个数、搭接长度和螺栓直径等主要因素进行讨论,从而为 FRP 节点设计提供参考。

2 FRP 连接试验

为了研究拉挤成型复合材料胶栓混合连接的性能,在影响其承载力的众多因素中选取端距、螺栓个数、搭接长度和螺栓直径四个主要因素为变量,分别设置了四组对比试件来研究这四个因素对胶栓混合连接的影响。同时加入了仅用胶接、仅用螺栓连接试件各一组与胶栓混合连接做对比分析。

2.1 试件材料

1) 螺栓:螺栓为全牙不锈钢螺栓,型号为 A2-70,直径分别为 6mm、10mm、14mm,抗拉强度 700MPa,屈服强度 450MPa。

2) 复合材料:以环氧树脂为基体,玻璃纤维拉挤成型,纤维体积含量 70%,拉挤方向抗拉强度为

640MPa。

3) 胶黏剂:以乙烯基树脂为原料,预促进,触变粘结剂,型号为 Nebond VE6100-W-1,加入固化剂 M-50 为 1%~3%,常温下固化时间为 2h 左右。

2.2 试件制作工艺

首先将搭接面打磨后用丙酮擦干净,然后往胶黏剂内按比例加入适量固化剂,搅拌均匀后,涂覆在被粘结基材表面。搭接范围内均匀涂上胶黏剂(乙烯基),在胶黏剂尚未固化时,用扭力扳手拧紧螺栓,螺栓上施加的扭矩为 $10\text{N} \cdot \text{m}$,待胶层固化后测得此时胶层厚度约为 0.4mm。另外,考虑到实际应用时栓孔误差,为了便于安装,预制栓孔直径比螺栓直径大 2mm。

2.3 试件设置

试验所用复合材料板厚度为 8mm,宽 80mm,所有试件螺栓边距均为 20mm。为了研究螺栓端距、个数、搭接长度和螺栓直径对混合连接性能的影响,设置了四组不同的构件,以及仅胶接和仅螺栓连接的对比试件,试件尺寸示意图及详细尺寸如图 1 和表 1 所示。

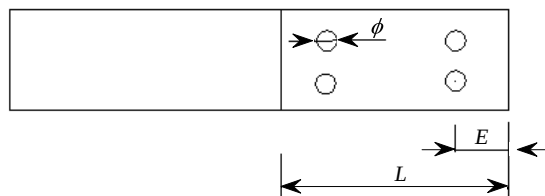


图 1 试件尺寸示意图

Fig.1 Diagram of the specimen

表 1 试件设置

Table 1 Parameter settings of specimens

分组	试件编号	端距 E/mm	螺栓个数 B	搭接长度 L/mm	螺栓直径 ϕ/mm
第 1 组	2E	20	4	150	10
	3E	30	4	150	10
	4E	40	4	150	10
	5E	50	4	150	10
	150L	40	4	150	10
第 2 组	200L	40	4	200	10
	250L	40	4	250	10
	4B	40	4	200	10
第 3 组	6B	40	6	200	10
	8B	40	8	200	10
	6D	24	4	150	6
第 4 组	10D	40	4	150	10
	14D	56	4	150	14
栓接(Bolted)		30	4	150	10
胶接(Bonded)		—	0	150	—

其中, 每个编号做三个相同的试件, 荷载取其平均值, 加载方向均为拉挤成型方向。试件加载装置为 100T 万能试验机, 加载速度约为 1mm/min, 图 2 为加载的照片。



图 2 构件加载照片
Fig.2 Photo of the specimens under load

3 试验结果与分析

3.1 端距对连接性能的影响

第 1 组对比试件仅端距尺寸不同, 该组试件承载力以及连接效率如表 2 所示, 从表 2 可以看出, 混接承载力大小随端距的变化规律并不明显, 即端距的变化对混接承载力的影响不大。

表 2 不同端距的试验结果
Table 2 Test results of different end distances

试件	1/kN	2/kN	3/kN	平均承载力/kN	平均破坏 应力/MPa	连接效率/(%)
2E	110.91	96.84	96.84	101.53	158.64	24.79
3E	89.38	91.59	99.32	93.43	145.98	22.81
4E	109.24	114.22	102.60	108.69	169.82	26.53
5E	106.75	109.26	101.79	105.93	165.52	25.86

图 3 为不同端距混接的荷载位移曲线。从荷载-位移曲线可以看出, 虽然不同端距的混接承载力大致相同, 但是随着端距的增加, 构件的延性有较大提高。刚开始施加荷载时, 荷载主要由胶层承担, 因此初始的刚度与胶接基本相同, 刚度较大。当荷载加至 40kN 左右时, 胶层的逐步开裂。端距 E 较小时, 螺栓比较靠近搭接端部, 能够较早抵抗由于偏心弯矩引起的剥离力, 也能够较早承担荷载, 搭接端部胶层刚开始剥离, 螺栓即与胶层共同承担荷载, 所以继续加载时, 刚度几乎保持不变, 但是由于端距较小, 胶层剥离及 GFRP 板剪切或劈裂破坏过程较短, 当荷载达到最大值时突然破坏。随着端距的增大, 当端距 $E > 30\text{mm}$ 时, 胶层开裂后, 荷载逐渐由胶层转移到螺栓上, 此时连接刚度有所降低, 但是由于端距较大, 胶层剥离及 GFRP 板剪切

或劈裂破坏的过程相对较长, 所以延性相对较好, 如图 3 中的 3E 及 5E 所示。试件 4E 组由于在荷载加至 82kN 时引伸计出现问题, 所以没能测得完整的荷载位移曲线, 但是从加载时荷载变化情况来看, 延性和 3E、5E 类似。

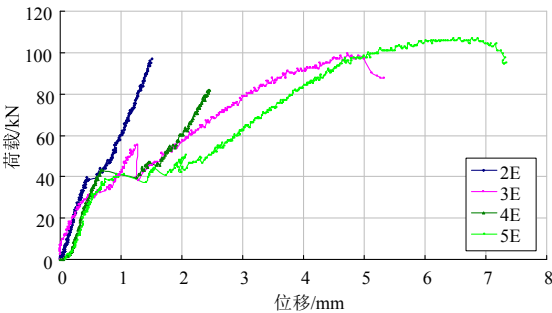


图 3 不同端距的混接荷载位移曲线
Fig.3 Comparison of the load-displacement curves of hybrid connections with different end distances

同时, 端距 E 的变化对试件的破坏模式有较大的影响。当端距较小, 如 2E 试件组, 栓孔前端 GFRP 在较小的压应力下就发生破坏, 破坏模式主要为胶层开裂, 复合材料板前端劈裂或栓孔前端剪切破坏, 栓孔后面出现劈裂裂痕, 后排螺栓基本完好(图 4)。当端距增至 30mm 时, 即 3E 试件组, 破坏模式主要为胶层开裂, 复合材料板前端劈裂, 栓孔后端出现劈裂裂痕或者栓孔剪切破坏, 后排螺栓后排栓孔出现了轻微的劈裂或剪切裂痕, 如图 5 所示。端距为 40mm 和 50mm 时, 前排栓孔位置复合材料板前端劈裂, 栓孔后端出现劈裂裂痕或者栓孔剪切破坏。由于前后两排螺栓距离较近, 后排螺栓承载力较大, 两排螺栓之间的复合材料板发生了劈裂或剪切破坏, 栓孔后面出现了劈裂裂缝(图 6)。另外, 5E 试件组还出现了后排螺栓 90°位置处部分复合材料板沿横向拉断破坏, 这在拉挤成型复合材料的连接破坏中较为少见, 说明此时充分发挥了材料的强度, 只是端距过大, 不能有效抵抗胶层的剥离。



图 4 2E 组破坏模式
Fig.4 Failure mode of Group 2E



图 5 3E 组破坏模式

Fig.5 Failure mode of Group 3E

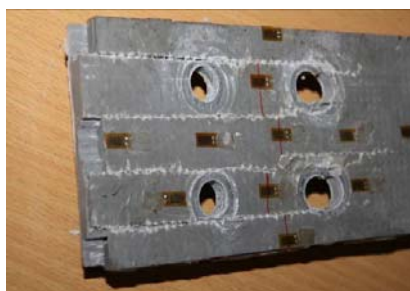


图 6 4E 和 5E 组破坏模式

Fig.6 Failure modes of Groups 4E and 5E

综上所述,端距 E 对于拉挤成型 GFRP 板的胶栓混合连接的承载力影响较小,但是随着端距的增加,延性相应增加。端距过大时虽然能够充分发挥材料的强度,但容易使端部胶层剥离严重。因此,对于此类型复合材料板,端距与螺栓直径的比值 E/D 为 3~4 比较合适。

3.2 搭接长度对连接性能的影响

第 2 组对比试件仅搭接长度不同,该组试件承载力以及连接效率如表 3 所示。从表 3 可以看出,承载力最高的为 250L 试件组,连接效率为 28.92%。在胶接连接中,当搭接长度大于有效搭接长度时,承载力不再提高,但是搭接长度增加时,延性以及安全性会相应提高。在混合连接中,随着搭接长度的增加,变化趋势与胶接不同。

表 3 不同搭接长度的试验结果

Table 3 Experiment results of the specimens with different overlap lengths

试件	1/kN	2/kN	3/kN	平均承载力/kN	平均破坏应力/MPa	连接效率/(%)
150L	109.24	114.22	102.60	108.69	169.82	26.53
200L	101.93	100.25	106.86	103.01	160.96	25.15
250L	131.71	114.32	109.35	118.46	185.09	28.92

图 7 为 3 组不同搭接长度试件的荷载位移曲线。从荷载位移曲线可以看出,试件 250L 胶层完全开裂的时刻也就是试件完全破坏的时候,承载力达到最大值,胶层承担的荷载要大于螺栓单独承担

的荷载,因此胶层开裂后试件立即发生破坏,此时螺栓的作用只是抵抗外加荷载在单搭接区域所引起的剥离力。150L 和 200L 胶层承载力相对较低,胶层完全开裂时,螺栓能够完全承担所有荷载,因此延性较好不会发生突然破坏。

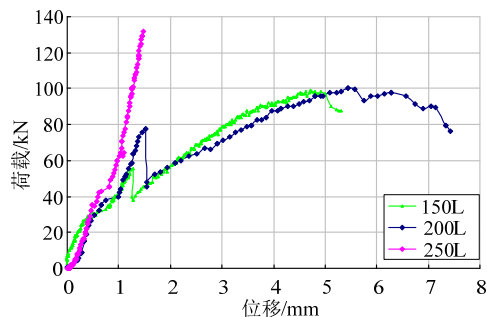


图 7 不同搭接长度的混接荷载-位移曲线

Fig.7 Comparison of the load-displacement curves with different overlap lengths

3 组试件端距 E 都为 40mm,由于搭接长度不同,所以两排螺栓之间的距离分别为 70mm、120mm、170mm,螺栓间距增大,后排螺栓较少发生破坏。其中,150L 试件组的破坏模式与 4E 相同(图 6),前排栓孔位置复合材料板前端劈裂,栓孔后端出现劈裂裂痕或者栓孔剪切破坏。由于前后两排螺栓距离较近,后排螺栓承力较大,因此两排螺栓之间的复合材料板发生了劈裂或剪切破坏,并且栓孔后面出现了劈裂裂缝,当螺栓间的距离逐渐加长,后排螺栓受损程度逐渐减轻。200L 及 250L 试件后排螺栓出现一些劈裂或剪切裂缝,如图 8 所示。



图 8 200L 和 250L 组破坏模式

Fig.8 Failure modes of Groups 200L and 250L

通过以上分析可以看出如果搭接长度过长,螺栓间的距离过大且胶接承载力较大,使两排螺栓间的复合材料板受力较小,不能使材料的强度充分发挥。因此对于拉挤成型的复合材料板来说,选择合适的螺栓纵向间距对混合连接的性能有重要影响。

3.3 螺栓个数对连接性能的影响

第3组对比试件仅螺栓个数不同,该组试件承载力以及连接效率如表4所示,从表4可以看出,采用6个和8个螺栓的混合连接承载力比4个螺栓的试件有了很大提高,其中承载力最高的为135.59kN,连接效率达到了33.1%。

表4 不同螺栓个数的试验结果

Table 4 Experiment results of specimens with different bolt numbers

试件	1/kN	2/kN	3/kN	平均承载力/kN	平均破坏应力/MPa	连接效率/(%)
4B	101.93	100.25	106.86	103.01	160.96	25.15
6B	134.20	141.65	124.28	133.38	208.40	32.56
8B	131.71	135.03	140.02	135.59	211.85	33.10

据已有研究,螺栓连接中螺栓的布置横向及纵向都不宜超过3个,并且角部的螺栓受力较大。本批试验横向螺栓都为2个,纵向分别为2、3、4,即螺栓总数分别为4个、6个、8个。

图9为不同螺栓个数B的混接荷载位移曲线。从荷载位移曲线可以看出,当胶层尚未完全开裂时,三组试件的荷载位移曲线相同,当胶层开裂后,4B试件组刚度下降,但是6B和8B试件组螺栓较多,螺栓间距较小,胶层开裂后刚度仍然较大,虽然延性不及4B试件组,但是承载力有较大提高。

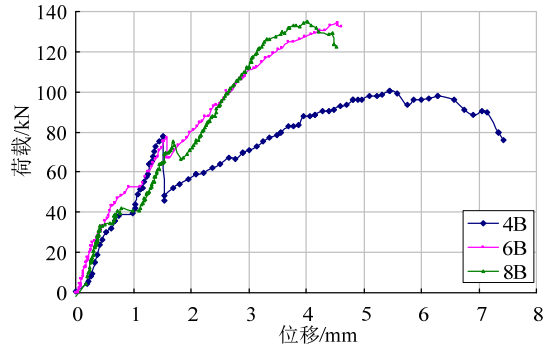


图9 不同螺栓个数的混接荷载-位移曲线

Fig.9 Comparison of the load-displacement curves with different bolt numbers

4B试件组的破坏模式与200L相同(图8)。6B和8B试件的破坏模式如图10所示,可以看出,多为栓孔剪切或栓孔90°位置拉伸破坏,劈裂破坏较少,承载力较高。这是由于当螺栓较多时,前后两排螺栓距离较近,螺栓与栓孔配合紧密,胶栓共同受力,能够取得很好的连接效果,充分利用材料强度,最终出现后排栓孔之间的GFRP板的拉伸破坏。



图10 6B和8B组破坏模式

Fig.10 Failure modes of Groups 6B and 8B

3.4 螺栓直径对连接性能的影响

第4组对比试件仅螺栓直径不同,该组试件承载力以及连接效率如表5所示。从表5可以看出,承载力最高的为10D试件组,14D试件组承载力稍低,最低的为6D试件组。6D、10D、14D试件螺栓直径D与板厚t的比值分别为0.75、1.25、1.75,根据已有研究,在销承压破坏模式下,当螺栓直径D与板厚t的比值接近1时,连接的承载力能够达到最大值,本批试件承载力变化虽与已有研究类似,但是并非销承压破坏。

表5 不同螺栓直径的试验结果

Table 5 Experiment results of specimens with different bolt diameters

试件	1/kN	2/kN	3/kN	平均承载力/kN	平均破坏应力/MPa	连接效率/(%)
6D	86.98	73.73	96.94	85.88	134.19	20.97
10D	109.24	114.22	102.60	108.69	169.82	26.53
14D	100.23	114.32	98.56	104.37	163.08	25.48

图11为不同螺栓直径的混接荷载-位移曲线,从荷载-位移曲线可以看出,当螺栓直径为6mm时,虽然刚开始刚度和其他组相同,但是承载力较小,延性较差,主要原因在于螺栓直径较小,受剪承载力不足,螺栓弯曲变形严重。螺栓直径为10mm和14mm时,荷载位移曲线较为相似,延性较好。

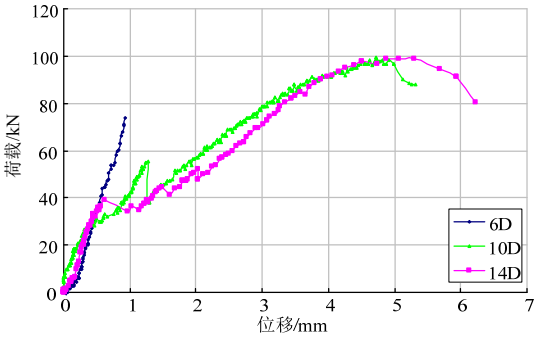


图11 不同直径的混接荷载-位移曲线

Fig.11 Comparison of the load-displacement curves with different bolt diameters

螺栓直径为 6mm 的试件破坏模式主要为前排螺栓的栓孔前端剪切破坏, 栓孔后面有劈裂裂缝, 后排栓孔基本完好, 螺栓大部分剪切变形。10D 试件组与 4E 相同(图 6), 14D 试件组第一排栓孔前端为剪切或劈裂破坏, 两排螺栓之间的复合材料板全为剪切破坏, 并且后排栓孔后面出现了劈裂裂缝(图 12)。另外, 本批试件也出现了后排螺栓 90°位置处部分复合材料板沿横向拉断破坏。



图 12 14D 组破坏模式

Fig.12 Failure mode of Group 14D

通过上述分析可知, 螺栓直径过大会对纵向纤维有较大的削弱, 且承载力并没有提高, 螺栓较小时, 如果保持 E/D 不变, 端距 E 的值相应减小, 所以连接的延性较小。另外, 胶层开裂后荷载转由螺栓承担, 螺栓直径过小会导致螺栓剪切变形甚至被剪断。

3.5 胶接、栓接、混接对比

为了比较不同连接方式的受力情况, 特设置了仅胶接、仅栓接的对比构件, 其试验结果与 3E 构件的试验结果进行比较。各种连接方式的承载力和连接效率如表 6 所示。从表 6 试验数据可以看出, 胶接承载力远远低于栓接和混合连接, 平均承载力仅为 41.98kN, 连接效率比较低, 破坏时胶层平均剪切强度为 3.5MPa。从试验的承载力可以看出胶接连接不适合此类较厚的拉挤成型复合材料板的连接。混合连接承载力最高, 螺栓连接的承载力稍低于混合连接, 但是混合连接的承载力并不等于胶接和栓接承载力之和, 这说明混合连接中, 胶层和螺栓分别承担的荷载并不是同时达到最大值。

三种连接方式的荷载位移曲线如图 13 所示, 从荷载-位移曲线可以看出, 胶接和混接初始连接刚度大致相同, 在位移为 0.5mm 时, 即荷载达到 30kN 左右时, 在剪力和剥离力的共同作用下胶接和混接端部都开始发生开裂, 并且加载时发出胶层开裂的声音。两者之间不同的是, 由于胶层端部应力集中

较为严重, 如果继续加载, 胶接中整个胶层会迅速完全剥离, 承载力较低。而在混接中, 当荷载小于 35kN 时, 胶层尚未剥离至螺栓附近, 荷载主要由胶层承担; 继续加载, 在相对位移达到 1.3mm 之前, 即荷载在 35kN~55kN 时, 螺栓和胶层共同承力, 刚度几乎保持不变; 在荷载达到 55kN 时, 胶层全部贯通, 形成贯通的缝隙, 此时荷载全部由螺栓来承担, 荷载降低至 40kN 左右; 继续加载时, 荷载上升, 但是刚度有所降低。

表 6 混合连接、栓接、胶接承载力以及连接效率

Table 6 Bearing capacities and efficiencies of hybrid connection, bolted connection and glued connection

试件	1/kN	2/kN	3/kN	平均承载力/kN	平均破坏应力/MPa	连接效率/(%)
3E	89.38	91.59	99.32	93.43	145.98	22.81
栓接	91.05	84.43	85.24	86.90	135.79	21.22
胶接	43.08	39.76	43.08	41.98	65.59	10.25

对于螺栓连接, 由于预钻的栓孔比螺栓直径大 2mm, 所以在加载开始的时候螺栓几乎不受力, 荷载由摩擦力来承担。由于施工方面的误差, 位移在 0mm~4mm 内时, 螺栓并不能共同受力。在相对位移达到 4mm 时, 连接刚度开始增加, 当加载至 91kN 时连接发生破坏。

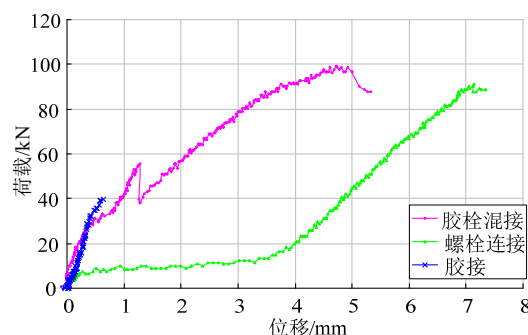


图 13 不同连接方式荷载位移曲线

Fig.13 Comparisons of the load-displacement curves of different connection types

三种连接方式的破坏模式有较大差别。胶接连接的破坏模式为胶层内聚破坏以及胶层与 FRP 界面均发生破坏。对于螺栓连接, 如果是层合复合材料, 那么栓接接头可能会出现剪切、劈裂、拉伸、局部挤压或者这几种破坏模式的组合, 但是试验所用材料为拉挤成型 GFRP, 纤维走向单一, 各向异性严重, 沿拉挤方向抗拉、压强度较高, 剪切强度较低, 所以这种材料螺栓连接的破坏模式极少会发生栓孔局部挤压破坏, 从试验结果来看, 破坏模式多为前排栓孔剪切破坏或者剪切与劈裂破坏相结

合, 后排螺栓基本完好无损。混合连接胶层开裂后贯通后, 荷载主要由螺栓来承担, 所以 GFRP 板的破坏模式和螺栓连接类似, 大部分仍为前排栓孔剪切、劈裂破坏或者剪切与劈裂破坏相结合。

从以上对比可以看出, 混合连接综合了胶接和栓接的优点, 承载力高, 刚度大。

4 胶栓混接的设计计算方法

复合材料的胶栓混合连接是由胶层和螺栓连接共同组成, 对于这两种连接方式的组合从已有的研究来看, 连接刚度、延性以及承载力都有一定改善, 但是由于传力机理非常复杂, 缺乏承载力计算方面的理论依据。另外, 胶栓混合连接受施工工艺方面的影响较大, 本试验的施工方法形成的胶层较薄, 因此下面总结的设计方法, 适用于该种情况。

从 3.5 节试验结果的分析来看, 胶接承载力极低, 仅为螺栓连接承载力的 50% 左右, 胶栓混接承载力比螺栓连接承载力有一定提高, 但是提高不是很多。在螺栓连接承载力远大于胶接承载力且搭接板为厚板的情况下, 采用混合连接在实际应用中的意义在于胶栓混合连接能够提供较好的连接性能, 如连接刚度、破坏时的延性、应力集中较小以及提供更高的安全性等, 其有限的承载力提高在计算中可以不计, 作为安全储备以提高连接接点的安全性。因此, 对于这本试验所采用的胶栓混合连接方式可以完全按照螺栓连接来计算其承载力大小, 胶接部分承载力忽略不计。

在试验中试件的破坏形式多为剪切破坏, 销承压破坏以及拉伸破坏极少发生, 因此可都按照螺栓连接剪切破坏来计算多栓连接承载力时, 然后在根据试验得到是数据乘以一定的折减系数, 即可得到最终的承载力。

根据 Matthias Oppe 等^[10]在螺栓连接中的研究, 螺栓连接剪切破坏承载力为:

$$P_s = 2(E - d_0 / 2) \times t \times f_{\tau, xy} \quad (1)$$

式中: P_s 为单栓连接剪切破坏承载力; E 为端距, d_0 为栓孔直径; t 为搭接板厚度; $f_{\tau, xy}$ 为平面内剪切强度。

在 3.1 节的分析中, 试件的承载力随着端距的变化并不明显, 因此可按照 2E 试件组的承载力来确定其有效剪切长度 $E - d_0 / 2$ 及平面内抗剪强度 $f_{\tau, xy}$, 得到:

$$E - d_0 / 2 = 15 \text{ mm} \quad (2)$$

$$f_{\tau, xy} = 105.76 \text{ MPa} \quad (3)$$

当螺栓排数较多时, 由于剪力滞后等原因, 各螺栓分配的荷载并不相等, 端部螺栓要比中间螺栓承担荷载高, 因此对于这种情况可以根据试验结果推算出一个相应的折减系数 β 。根据试件组 6B 和 8B 的试验结果, 可推导出当螺栓为三排或四排时, β 分别取 0.88 或 0.67。

因此对于三排螺栓或四排螺栓的连接节点可按式计算其连接承载力:

$$P_{\text{总}} = n\beta P_s \quad (4)$$

其中: n 为螺栓个数; β 为多螺栓折减系数; 当螺栓为三排或四排时; β 分别取 0.88 或 0.67。

当螺栓沿拉伸方向多于四排或栓距过大时, 因为螺栓荷载分布不均, 端部的螺栓会因为受力过大而首先发生破坏, 然后依次向内发展, 逐排破损, 其承载力提高有限, 因此为了保证各螺栓荷载分配均匀且充分发挥螺栓前端 FRP 板的抗剪, 栓距及端距不应小于 30mm 或 $3d$ 且不应过大。

5 结论

通过 FRP 胶接、栓接和混合连接的试验研究可以得出以下结论:

(1) 通过对比分析可以看出胶栓混合连接综合了胶接和螺栓连接的优点, 刚度大、延性好, 承载力比螺栓连接也有所提高;

(2) 端距 E 和搭接长度 L 对混接承载力的影响较小, 对混接破坏时的延性影响较大, 端距较小时延性较差;

(3) 螺栓直径 D 要与板厚相近为宜, 螺栓直径过小容易产生塑性应变甚至被剪断, 直径过大会使栓距或端距减小, 使搭接部位 FRP 板损伤过大;

(4) 螺栓个数 B 对胶栓混合连接的承载力影响最大, 因此增加螺栓个数会明显提高连接承载力;

(5) 由于拉挤成型的 FRP 为正交异性材料, 所以连接的破坏形式以剪切破坏和劈裂破坏为主, 无论端距如何变化, 接头中极少发生其他形式的破坏。

参考文献:

- [1] 沈观林. 复合材料力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
Shen Guanlin. Mechanics of composite materials [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1995. (in Chinese)

- [2] 马毓, 赵启林, 江克斌. 树脂基复合材料连接技术研究现状及在桥梁工程中的应用和发展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2010(2): 78—82.
Ma Yu, Zhao Qilin, Jiang Kebin. The state-of-art of the connection technology of FRP material and application in the bridge structures [J]. Fibre Reinforced Plastics/Composites, 2010(2): 78—82. (in Chinese)
- [3] 王丹勇. 层合板接头损伤失效与疲劳寿命研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
Wang Danyong. Damage failure and fatigue life research of laminate joints [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese)
- [4] 沃丁柱. 复合材料大全[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
Wo Dingzhu. Encyclopaedia of composites [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000. (in Chinese)
- [5] 鞠苏, 曾竟成, 江大志, 等. 碳纤维增强复合材料接头研究进展[J]. 高科技纤维与应用, 2006, 31(3): 31—35.
Ju Su, Zeng Jingcheng, Jiang Dazhi. Study progress in carbon fibre reinforced composite joint [J]. Hi-tech Fibre & Application, 2006, 31(3): 31—35. (in Chinese)
- [6] Heung-Joon Park. Bearing failure analysis of mechanically fastened joints in composite laminates [J]. Composite Structures, 2001, 53: 199—211.
- [7] Turvey G J. Bolted connections in PFRP structures [J]. Progress in Structural Engineering and Materials, 2000, 2(2): 146—156.
- [8] 王花娟, 杨杰, 刘新东, 等. 复合材料机械连接强度影响因素的研究进展[J]. 材料导报, 2007, 21(9): 438—440.
Wang Huajuan, Yang Jie, Liu Xindong, et al. Progress in research on affecting factors of mechanical joining strength of composite material [J]. Materials Review, 2007, 21(9): 438—440. (in Chinese)
- [9] Nguyen Duchai, Hiroshi Mutsuyoshi, Kensuke Shiroki, et al. Development of an effective joining method for a pultruded hybrid CFRP/GFRP laminate [C]. Beijing, China: Tsinghua University Press, 2010: 103—106.
- [10] Matthias Oppe, Jan Knippers. A consistent design concept for bolted connections in standardized GFRP-profiles [C]. Beijing, China: Tsinghua University Press, 2010: 1.

(上接第 313 页)

- [7] 刘庆宽, 郑云飞, 刘小兵, 等. 斜拉索风雨振的激振因素和气动控制措施[C]// 第 16 届全国结构风工程学术会议, 成都: 西南交通大学出版社, 2013: 115—116.
Liu Qingkuan, Zheng Yunfei, Liu Xiaobing, et al. Rain-wind induced vibration factors and aerodynamic control [C]// Proceedings of the 16th National Conference on Structure Wind Engineering, Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2013: 115—116. (in Chinese)
- [8] 陈政清. 桥梁风工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 157—159.
Chen Zhengqing. Bridge wind engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2005: 157—159. (in Chinese)
- [9] 郑云飞. 斜拉索风雨激振试验研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2013: 12—30.
Zheng Yunfei. Experimental investigation of rain-wind induced vibration of cables in cable-stayed bridges [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2013: 12—30. (in Chinese)
- [10] 刘庆宽. 多功能大气边界层风洞的设计与建设[J]. 实验流体力学, 2011, 25(3): 66—70.
Liu Qingkuan. Aerodynamic and structure design of multifunction boundary-layer wind tunnel [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2011, 25(3): 66—70. (in Chinese)