

FRP筋复合式锚具锚固性能的试验研究

蒋田勇¹ 方志²

(1 长沙理工大学 湖南长沙 410076, 2 湖南大学 湖南长沙 410082)

摘要:当复合材料FRP (Fiber Reinforced Polymer/Plastics) 筋或拉索应用到缆索承重桥梁的拉索体系中时, 粘结式锚具和夹片式锚具均有其自身的局限性。对此, 根据普通拉索锚固体系的特点, 并结合FRP筋夹片式锚具和粘结式锚具的研究成果, 提出了锚固FRP筋的复合式锚具。复合式锚具由后部的楔紧锚固和前部的粘结锚固组成, 其中楔紧锚固部分包括锚杯、带有凹齿的夹片、铝套管以及塑料薄膜, 粘结锚固部分包括钢套筒和粘结介质-活性粉末混凝土RPC (Reactive Power Concrete)。静载试验研究了锚杯长度、钢套筒长度、夹片预紧力、筋材预张拉力等参数对复合式锚具锚固性能的影响。结果表明: 复合式锚具试件中的极限荷载最大为208kN, 相应的锚固效率系数为104%, 大于95%, 满足规范要求。复合式锚具两种锚固形式的锚固长度较合理组合为: 对不预张拉锚具, 可取锚杯长度40mm以及粘结锚固长度100mm; 对预张拉锚具, 可取锚杯长度60mm以及粘结锚固长度60mm。提出的复合式锚具极限荷载计算式具有较好的适用性。

关键词:锚固性能 复合式锚具 FRP RPC

引言

目前, 钢拉索或吊杆存在抗疲劳和耐腐蚀性能的问题, 虽然各种有效的措施使上述问题得到了缓解, 但是并没有从根本上解决, 从而导致国内外近年来有多座桥梁的拉索或吊杆因耐久性不足或疲劳损坏而更换, 经济损失较大。因此现代大跨桥梁的进一步发展, 势必依赖于抗疲劳性能好以及耐腐蚀的新型复合材料的应用。高级复合材料纤维增强复合材料FRP (Fiber Reinforced Polymer/Plastic) 以其强度高 (有的高于3000 MPa, 约为高强预应力钢筋的2倍)、重量轻 (约为钢材的1/5)、免锈蚀和抗疲劳性能好等优异性能极有希望成为处于恶劣自然环境下桥梁结构中传统钢材的替代品^[1-2]。但是纤维增强复合材料FRP筋是一种横观各向同性材料, 其横向与纵向强度的比值较小, 因此用于锚固钢绞线的普通拉索锚固体系不再适合锚固FRP筋, 否则将会因FRP筋横向强度过低导致过早失效^[3]。

高级复合材料FRP筋应用到斜拉桥的拉索体系, 粘结式锚具和夹片式锚具均有其自身的局限性。粘结式锚具由于需要较大的锚固长度, 而夹片式锚具长期处在较大疲劳应力幅状态下由于夹片小端的刚度较大使得对损伤敏感的FRP筋易发生疲劳破坏^[4-6]。为了解决高级复合材料FRP筋在

缆索支撑体系中的应用问题, 吸取普通钢拉索锚固体系 (如Stronghold体系和Dywidag体系) 的特点^[7-10], 即普通拉索锚固体系一般由后部的夹片锚或镦头锚和前部的环氧砂浆粘结锚固两部分组合而成。结合FRP筋粘结式锚具和夹片式锚具作者既有的研究成果, 提出了锚固FRP筋或拉索的复合式锚具, 以期解决现存FRP筋或拉索粘结式锚具和夹片式锚具的不足之处。迄今为止, 国内外尚未见有关FRP筋或拉索复合式锚具的文献报道。

FRP筋复合式锚具由后部的楔紧锚固和前部的粘结锚固组成, 其中楔紧锚固部分包括锚杯、带有凹齿的夹片、铝套管以及塑料薄膜, 粘结锚固部分包括钢套筒和粘结介质-超高性能混凝土RPC (Reactive Power Concrete), 其构造如图1所示。

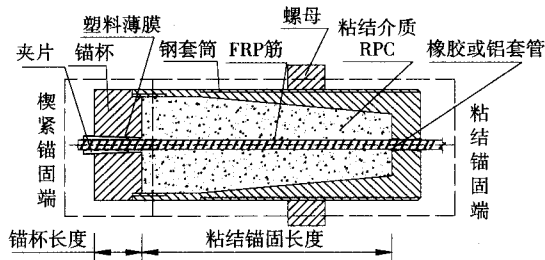


图1 CFRP筋复合式锚具

FRP筋复合式锚具可在RPC灌注之前对FRP筋预张拉, 当RPC灌注且达到足够强度之后再放松FRP筋, 以此来发挥后部夹片式锚具的作用, 最终使得工作阶段锚具的粘结式部分和夹片式部分能有效地共同锚固FRP筋或拉索。

本文荣获第四届欧维姆优秀预应力论文竞赛三等奖 (原载《土木工程学报》2010, No. 2)

1 试验内容

1.1 RPC的配制和养护

试验所用RPC的组成配比为水泥:硅灰:石英粉:标准砂:减水剂=1:0.25:0.3:1.1:0.025,水胶比为0.2。RPC在65~85℃热水中养护4天。每组试件预留3个100mm×100mm×100mm立方体试块,以期测得每组试件对应的RPC的抗压强度。

1.2 FRP筋的物理力学性能

试验采用的FRP筋为具有压纹表面的CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer/Plastics) 筋,其直径为9.8mm、纵向弹性模量为147GPa、横向弹性模量为15.3GPa、剪切模量为5.89GPa、泊松比 ν_{LT} 和 ν_{TT} 分别为0.27和0.45^[11]。

1.3 复合式锚具试件制作

复合式锚具楔紧锚固部分锚杯和夹片的材料选用30SiMn2MoVA合金结构钢,该材料经过热处理后屈服强度为850MPa,夹片的硬度达到40~45HRC,锚杯的硬度达到30~32HRC。锚杯和夹片倾角角度差为0.1°。夹片小端边缘采用10°倒角。锚杯的外径为47mm,内壁倾角为3°,锚杯长度有40mm和60mm两种。夹片内表面采用凹齿形式,其中凹齿宽度在3.1~4.1mm之间、凹齿深度取为0.3mm、40mm锚杯长度的凹齿间距为10mm、60mm锚杯长度的凹齿间距为12mm。夹片预紧力包括40kN和60kN。

粘结锚固部分的钢套筒选用40Cr材料,内表面粗糙,筒壁采用等厚度,为2.5mm。粘结锚固长度分别为40mm、60mm以及100mm等三种。

复合式锚具根据有无预张拉分为预张拉复合式锚具和普通复合式锚具。复合式锚具见图2所示。



图2 试验复合式锚具

复合式锚具预张拉是指钢套筒内活性粉末混凝土RPC灌注之前,对筋材进行张拉并持载,在FRP处于张拉状态下灌注锚具粘结部分的RPC,待养护RPC达到要求的强度后再放松FRP筋,此举有两个作用:其一可有效发挥锚具后部夹片式

部分的作用,其二可使筋材的回缩力传递到粘结界面,以期达到抵消使用状态下的部分张拉荷载,从而提高粘结部分的锚固性能,进一步缩短锚固长度。依据粘结式锚具的研究成果^[12],本文试验的复合式锚具放张时筋材的张拉力均采用19.6kN。预张拉装置如图3所示。

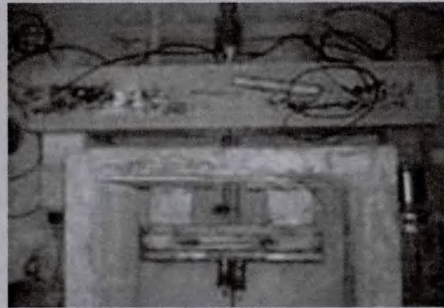


图3 预张拉装置

1.4 加载程序及其装置

复合式锚具张拉装置如图4所示。试件一端为试验锚具;另一端为夹片式锚具。试验中通过振弦式力传感器来控制加载。百分表1是用来测量CFRP筋自由端的滑移量,百分表2是用来跟踪夹片跟进尺度。加载速度为100MPa/分钟^[13]。表1为夹片式锚具、粘结式锚具以及复合式锚具的试验结果比较。其中,夹片式锚具的极限荷载 T_W 为复合式锚具中楔紧锚固部分(夹片式锚具)对应的极限荷载,粘结式锚具的极限荷载 T_B 为复合式锚具中粘结锚固部分(粘结式锚具)对应的极限荷载,与预张拉复合式锚具对应的夹片式锚具和粘结式锚具也均采用了预张拉工艺。复合式锚具的极限荷载 T_{WB} 为本文试验锚具的极限荷载。

2 极限荷载的试验结果及其分析

2.1 破坏形式

试验结果表明,复合式锚具的破坏形式为拔出破坏和拉断破坏,如图5所示,与其对应的夹片式锚具为CFRP筋夹断破坏和滑移破坏、粘结式锚具为CFRP筋滑移破坏。

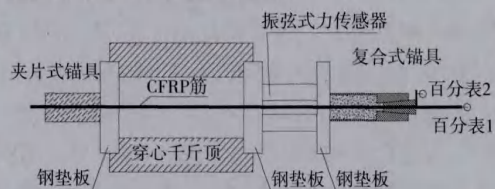


图4 试验张拉装置

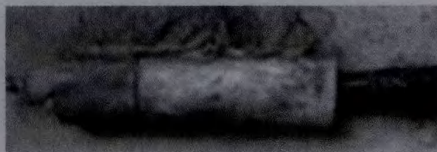
表1 夹片式锚具、粘结式锚具以及复合式锚具的试验结果比较

序号	RPC抗压强度(MPa)	锚杯长度(mm)	粘结锚固长度(mm)	筋材预张荷载(kN)	夹片预紧荷载(kN)	极限荷载(kN)			复合式锚具楔紧锚固部分发挥的效率 α (%)	复合式锚具锚固效率系数 η	
						夹片式锚具 T_w	粘结式锚具 T_B	复合式锚具 T_{WB}			
1	128	60	40	0	60	176.7	21.2	120	滑移	55.91	0.60
2	128	60	60	0	60	176.7	40.5	142	滑移	57.44	0.71
3	128	60	60	0	60	176.7	40.5	146.7	滑移	60.10	0.74
4	128	60	60	0	60	176.7	40.5	140	滑移	56.31	0.70
5	128	60	100	0	60	176.7	81.4	208	拉断	71.65	1.04
6	128	60	60	0	40	140	40.5	138	滑移	69.64	0.69
7	128	40	40	0	60	142	21.2	101	滑移	56.20	0.51
8	128	40	60	0	60	142	40.5	130	滑移	63.0	0.65
9	128	40	60	0	40	128.6	40.5	115.7	滑移	58.48	0.58
10	128	40	100	0	60	142	81.4	194.3	拉断	79.51	0.98
11	123	40	40	19.6	60	157	29	128.2	滑移	63.18	0.64
12	123	40	60	19.6	60	157	61.8	169.7	滑移	68.73	0.85
13	123	60	40	19.6	60	181	29	143.9	滑移	63.48	0.72
14	123	60	60	19.6	60	181	61.8	195.3	拉断	73.76	0.98

注:复合式锚具楔紧锚固部分发挥的效率 α 等于复合式锚具极限荷载 T_{WB} 与粘结式锚具极限荷载 T_B 之间的差值与夹片式锚具极限荷载 T_w 的百分比;锚固效率系数 η 等于锚具组装件的实测极限拉力 F_{pm} 与试件实测拉断荷载(试件5、10和14等3个试件)平均值 F_{pm} 之比。



(a) 拔出破坏



(b) 拉断破坏

图5 复合式锚具的破坏形式

由于复合式锚具在楔紧锚固部分的夹片小端存在粘结介质RPC,使得夹片在自动跟进时受到RPC阻碍,减少了夹片的回缩量,大大地缓解了夹片对CFRP筋的咬伤,避免了CFRP筋在锚固区夹断。

2.2 夹片预紧力的影响

图6为夹片预紧力与极限荷载的关系曲线。从图6可以看出,夹片预紧力越大,复合式锚具的极限荷载也越大。这主要是由于增加夹片预紧力,有利于提高夹片施加给CFRP筋的表面压力,从而增加了CFRP筋与夹片之间的摩擦力,达到提高复合式锚具的楔紧锚固承载能力,最终提高复合式锚具极限拉力。对于锚杯长度为40mm和粘结锚固长度为60mm的复合式锚具,当

夹片预紧力为40kN,其极限荷载为115.7kN;当夹片预紧力为60kN,极限荷载为130kN,与前者相比提高了12.4%。对于锚杯长度为60mm和粘结锚固长度为60mm的复合式锚具,当夹片预紧力为40kN,其极限荷载为138kN;而当夹片预紧力为60kN,其极限荷载为146.7kN,与前者相比提高了6.3%。

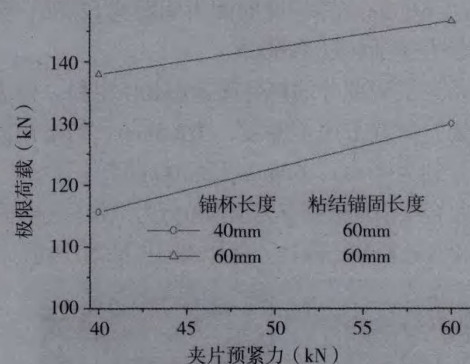


图6 夹片预紧力与极限荷载的关系曲线

2.3 粘结锚固长度的影响

图7为粘结锚固长度与极限荷载的关系曲线。从图7还可以看出,粘结锚固长度越大,复合式锚具的极限荷载也越大。这主要是由于粘结锚固长度越大,复合式锚具的CFRP筋滑移量越小,使得CFRP筋和夹片的滑移同步性越好,不但可以提高粘结锚固部分的承载能力,而且还可以提高楔紧锚固部分的承载能力,最终可明显提

高复合式锚具的极限荷载。

对于锚杯长度为40mm和预紧力为60kN的复合式锚具,当粘结锚固长度分别为40mm、60mm以及100mm,其极限荷载分别为101kN、130kN以及194.3kN,后两者相对于前者分别提高了28.7%和92.4%。对于锚杯长度为60mm和预紧力为60kN的复合式锚具,当粘结锚固长度分别为40mm、60mm以及100mm,其极限荷载分别为120kN、146.7kN以及208kN,后两者的极限荷载相对于前者的极限荷载分别提高了22.2%和73.3%。分析表明,粘结锚固长度对复合式锚具的极限荷载提高程度相对较大,即粘结长度每增加20mm,极限荷载的提高可超过20%。

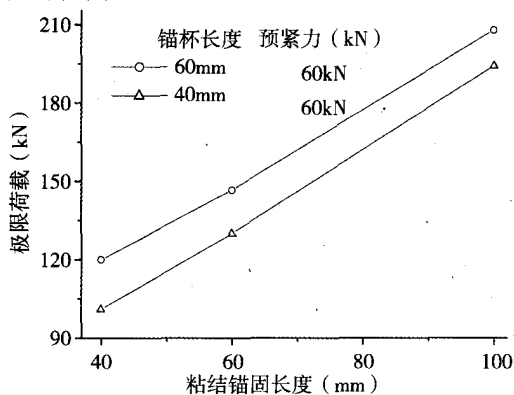


图7 粘结锚固长度与极限荷载的关系曲线

2.4 锚杯长度的影响

图8为锚杯长度与极限荷载的关系曲线。从图8和表1可以看出,锚杯长度越大,复合式锚具的极限荷载也越大,但其楔紧锚固部分发挥的效率越小。这主要是由于当增加锚杯长度时,虽然复合式锚具的楔紧锚固部分承载能力有所增加,但是单独的夹片式锚具的极限荷载提高更快,使得复合式锚具的楔紧锚固部分发挥的效率反而减小了。

对于粘结锚固长度为40mm和预紧力为60kN的复合式锚具,当锚杯长度为40mm,其极限荷载为101kN,楔紧锚固部分发挥的效率为56.20%;而当锚杯长度为60mm,其极限荷载为120kN,楔紧锚固部分发挥的效率为55.91%,可见后者的极限荷载比前者提高了18.8%,而后者的楔紧锚固部分发挥的效率比前者反而减小了0.29%。对于粘结锚固长度为60mm和预紧力为60kN的复合式锚具,当锚杯长度为40mm,其极限荷载为130kN,楔紧锚固部分发挥的效率为63.0%;当锚杯长度

为60mm,其极限荷载为146.7kN,楔紧锚固部分发挥的效率为60.1%,可见后者的极限荷载比前者提高了12.8%,而后者的楔紧锚固部分发挥的效率比前者反而减小了2.9%。

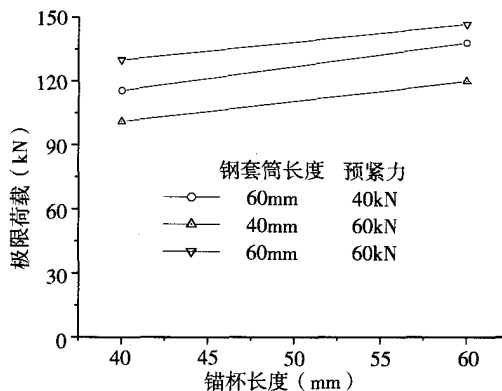


图8 锚杯长度与极限荷载的关系曲线

2.5 筋材预张拉荷载的影响

图9为筋材预张荷载与极限荷载的关系曲线。从图9可以看出,筋材预张荷载越大,复合式锚具的极限荷载也越大。这主要是由于筋材预张拉有以下两个作用:其一是可有效发挥复合式锚具后部楔紧部分的作用,其二是可使筋材的回缩力传递到粘结界面,以期达到抵消使用状态下的部分张拉荷载,从而提高粘结部分的锚固性能。

对于粘结锚固长度为40mm和锚杯长度为40mm的复合式锚具,当筋材没有进行预张拉时,其极限荷载为101kN;当筋材预张力为19.6kN时,其极限荷载为128.2kN,可见后者比前者提高了26.9%;对于粘结锚固长度为60mm和锚杯长度为40mm的复合式锚具,当筋材没有进行预张拉时,其极限荷载为130kN;当筋材预张力为19.6kN时,其极限荷载为169.7kN,可见后者比前者提高了30.5%;对于粘结锚固长度为40mm和锚杯长度为60mm的复合式锚具,当筋材没有进行预张拉时,其极限荷载为120kN;当筋材预张力为19.6kN时,其极限荷载为143.9kN,后者比前者提高了20%。对于粘结锚固长度和锚杯长度均为60mm的复合式锚具,当筋材没有进行预张拉时,其极限荷载为142kN,破坏形态为滑移破坏;当筋材预张力为19.6kN时,其极限荷载为195.3kN,后者比前者提高了37.5%,且破坏形态为希望的拉断破坏。

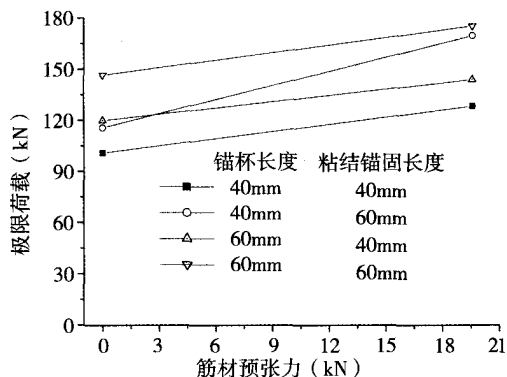


图9 筋材预张拉荷载与极限荷载的关系曲线

3 荷载滑移曲线的试验结果及其分析

3.1 粘结锚固长度对荷载滑移曲线的影响

图10为粘结锚固长度对荷载滑移曲线的影响。从图10可以看出，粘结锚固长度越大，相同的荷载对应的CFRP筋和夹片的滑移量越小。对于锚杯长度为60mm和预紧力为60kN的复合式锚具，粘结锚固长度分别为40mm、60mm以及100mm，在荷载为100kN时CFRP筋自由端的滑移量分别为2.93mm、2.79mm和2.52mm，且粘结锚固长度分别为40mm和60mm的夹片滑移量分别1.52mm和1.21mm，而粘结锚固长度为100mm的试件没有测试夹片的滑移量。对于锚杯长度为40mm和预紧力为60kN的复合式锚具，粘结锚固长度分别为40mm、60mm以及100mm，在荷载达到100kN时CFRP筋自由端的滑移量分别为5.34mm、3.07mm和2.69mm，对应的夹片的滑移量分别为2.61mm、1.87mm和1.84mm。

上述分析也表明了，CFRP筋的滑移量大于夹片的滑移量，即相同荷载对应的CFRP筋和夹片的滑移量不同步，这将减小夹片施加给CFRP筋的正压力，缓解了CFRP筋在夹片小端的应力集中和切口效应，避免了CFRP筋在锚固区夹断。

3.2 锚杯长度对荷载滑移曲线的影响

图11为锚杯长度对荷载滑移曲线的影响。从图11可以看出，锚杯长度越大，相同的荷载对应的CFRP筋和夹片的滑移量越小。这主要是由于锚杯长度越大，复合式锚具的极限荷载也越大，相应的CFRP筋和夹片的滑移量越小。

对于粘结锚固长度为40mm和预紧力为60kN的复合式锚具，锚杯长度分别为40mm和60mm，在荷载为100kN时CFRP筋的滑移量分别为5.34mm和2.93mm，两者相差2.41mm；对应夹片的滑移量分别为2.61mm和1.52mm，两者相差1.09mm。对于粘结锚固长度为60mm和预紧力为60kN的复合

式锚具，锚杯长度分别为40mm和60mm，在荷载达到100kN时CFRP筋的滑移量分别为3.07mm和2.79mm，两者相差0.28mm；对应的夹片的滑移量分别为1.87mm和1.21mm，两者相差0.66mm。

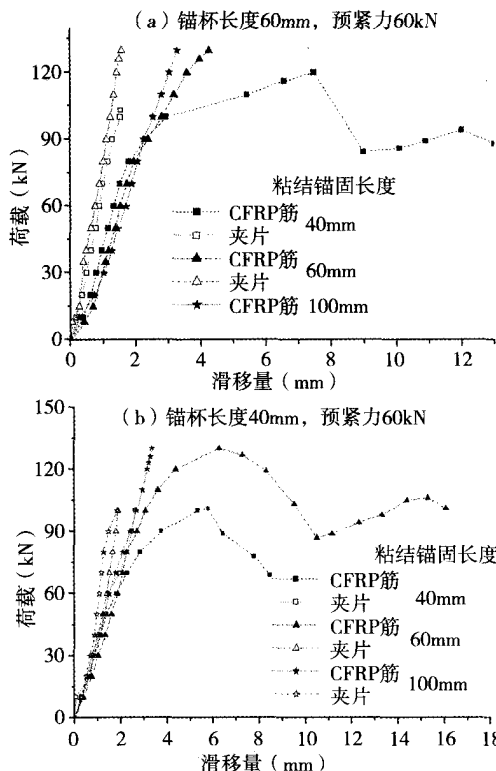


图10 粘结锚固长度对荷载滑移曲线的影响

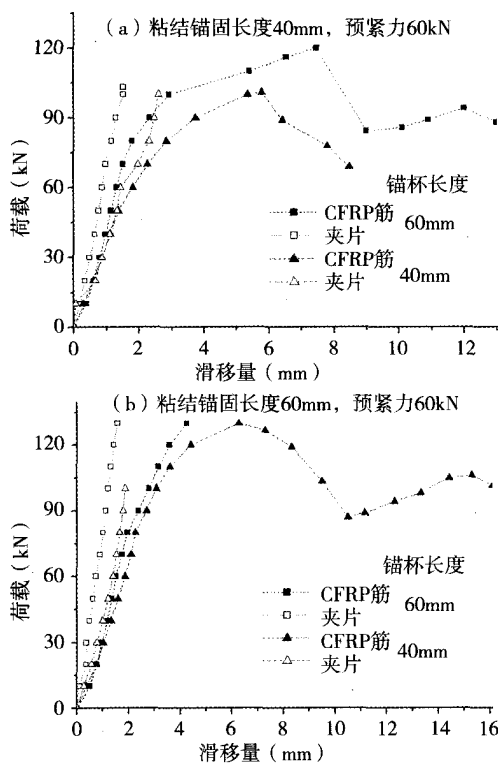


图11 锚杯长度对荷载滑移曲线的影响

3.3 夹片预紧力对荷载滑移曲线的影响

图12为夹片预紧力对荷载滑移曲线的影响。从图12可以看出,夹片预紧力越大,相同的荷载对应的CFRP筋和夹片的滑移量越小。

对于粘结锚固长度为60mm和锚杯长度为60mm的复合式锚具,预紧力分别为40kN和60kN的两组试件,荷载为100kN时CFRP筋的滑移量分别为3.14mm和2.79mm,两者相差0.35mm;对应夹片的滑移量分别为1.28mm和1.21mm;两者相差0.07mm。

对于粘结锚固长度为60mm和锚杯长度为40mm的复合式锚具,预紧力分别为40kN和60kN,在荷载为100kN时CFRP筋的滑移量分别为3.72mm和3.07mm,两者相差0.65mm;对应夹片的滑移量分别为1.91mm和1.87mm;两者相差0.03mm。

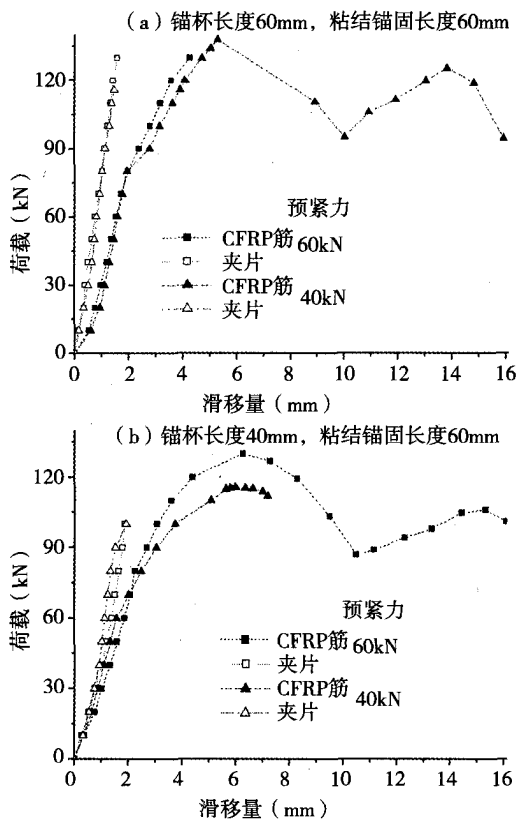


图12 夹片预紧力对荷载滑移曲线的影响

3.4 筋材预张拉力对荷载滑移曲线的影响

图13为筋材预张拉力对荷载滑移曲线的影响。从图13可以看出,筋材预张拉力的存在使复合式锚具的楔紧锚固部分各接触面更

紧凑,粘结部分的粘结滑移更加平稳,最终使得预张拉复合式锚具的CFRP筋和夹片的滑移量与普通复合式锚具的CFRP筋和夹片的滑移量小。

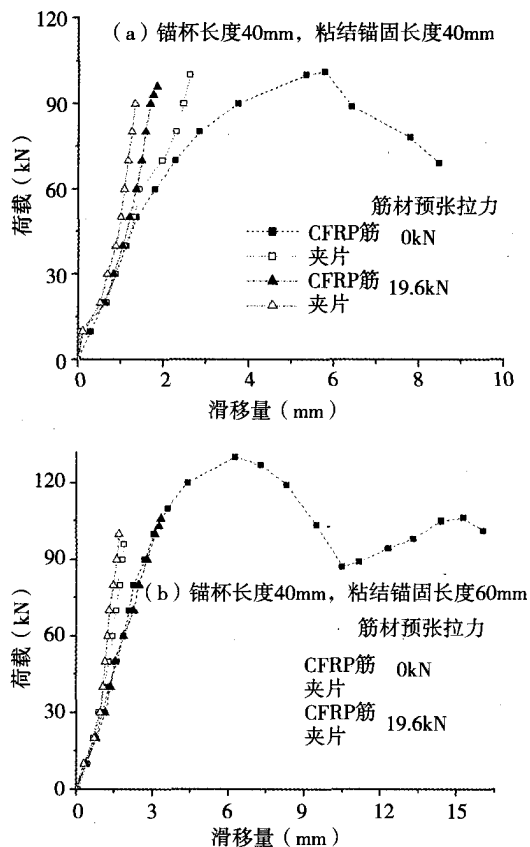


图13 筋材预张拉力对荷载滑移曲线的影响

3.5 荷载滑移曲线比较

图14为相应的单独夹片式锚具、单独粘结式锚具以及复合式锚具的荷载滑移曲线比较,图中序号为表1对应的序号。从图14可以看出,复合式锚具的荷载滑移曲线上升段与夹片式锚具的荷载滑移曲线上升段基本一致。在相同的荷载下,复合式锚具的CFRP筋的滑移比夹片式锚具的CFRP筋滑移小,且两者的差值随锚杯长度增加迅速减小。

从图14还可以看出,复合式锚具的荷载滑移曲线下降段与粘结式锚具的荷载滑移曲线下降段基本一致,即CFRP筋的荷载达到最大以后,会重复出现抵抗拉力,导致荷载滑移曲线连续出现峰值。这主要是由于粘结锚固端的机械咬合力和摩擦力在荷载在达到最大值以后仍将继续工作,这使得CFRP筋受到的力会重新聚集,导致荷载滑移曲线连续出现了几个峰值。

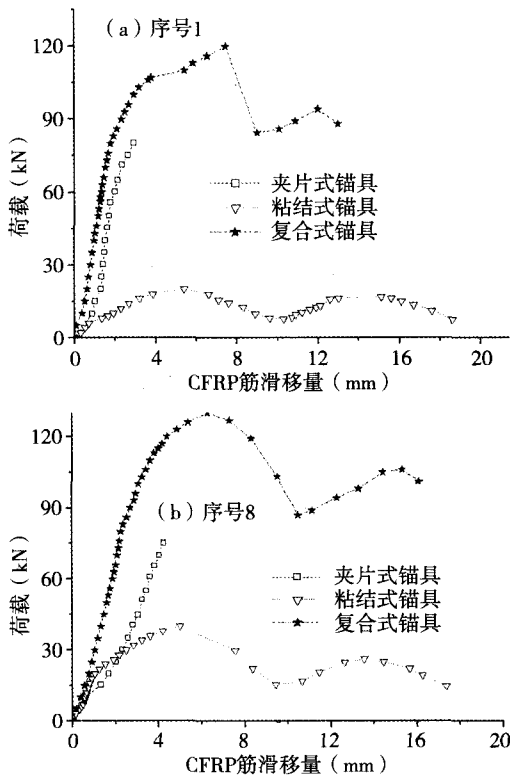


图14 夹片式锚具、粘结式锚具以及复合式锚具的CFRP筋荷载滑移曲线比较

4 应力测试结果

复合式锚具的应力测试包括锚杯的轴向应力和环向应力以及钢套筒的轴向应力和环向应力。应力测试试件的锚杯长度为60mm，粘结锚固长度为100mm，夹片预紧力为60kN，筋材预张力为0.0kN。测试位置布置图如图15所示。应力测试结果如图16所示。

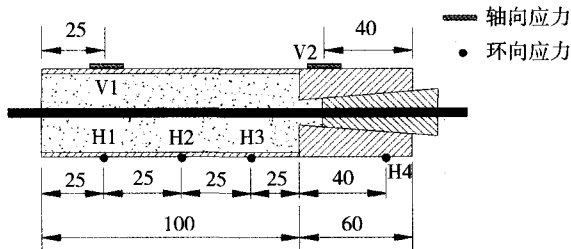


图15 应力测点位置

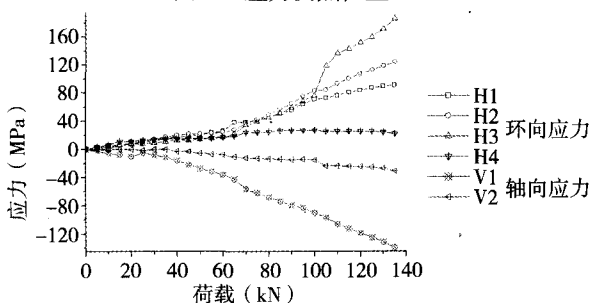


图16 复合式锚具的应力试验结果

从图16可以看出，复合式锚具应力分布不均匀；环向应力为受拉，其中钢套筒的应力在与楔紧锚固部分的接触位置最大，并且向加载端逐渐减小；锚杯轴向应力为受压，其中张拉端的应力最大；锚杯环向应力和轴向应力均随荷载的增加而增加。

5 极限荷载的计算

由于复合式锚具的粘结锚固部分锚固机理与粘结式锚具的锚固机理相同，对于具有相同粘结锚固长度的复合式锚具和粘结式锚具，可以认为极限状态下复合式锚具的粘结锚固部分所承受的荷载与粘结式锚具的极限荷载相等。另外，复合式锚具楔紧锚固部分的夹片小端存在粘结介质RPC，使得夹片锚具的极限承载力按照文献[4]计算时应进行相应的折减，即表1中的复合式锚具极限承载力应该等于粘结式锚具极限承载力与折减后的夹片式锚具极限承载力之和。

对实测数据进行数据拟合，可以得到复合式锚具的极限荷载计算式为

$$T_{WB} = T_B + 0.55 (0.921 + 0.002p) (1 + 0.005q) (0.755 + 0.006l_B) (1.1 - 0.002l_W) T_W \quad (1)$$

式中： T_{WB} 为复合式锚具的极限荷载(kN)； T_B 为粘结式锚具的极限荷载(kN)； T_W 为夹片式锚具的极限荷载(kN)； p 为夹片预紧力(kN)； q 为筋材预张力(kN)； l_B 为粘结锚固长度(mm)； l_W 为锚杯长度(mm)。

其中，根据作者的粘结式锚具研究成果^[5]，可以得到粘结式锚具的极限荷载表达式如下

$$T_B = \pi d l_B (0.47 + 0.02 \frac{l_B}{d}) (1 + 0.05\alpha) f_{cu}^{3/4} \quad (2)$$

式中， d 为CFRP筋直径(mm)； l_B 为粘结锚固长度(mm)； f_{cu} 为粘结介质的抗压强度(MPa)； α 为钢套筒内壁倾角(°)。

根据作者的夹片式锚具研究成果^[4]，可以得到夹片式锚具的极限荷载表达式如下

$$T_W = \xi_1 \xi_2 \xi_3 \xi_4 \xi_5 \xi_6 F_{pm} \quad (3)$$

$$\xi_1 = t^{0.25} \quad \text{且 } 0.4 \leq t \leq 1 \quad (4)$$

$$\xi_2 = -9h^2 + 6h \quad \text{且 } 0.1 \leq h \leq 0.6 \quad (5)$$

$$\xi_3 = -0.008s^2 + 0.18s \quad \text{且 } 10 \leq s \leq 12.85 \quad (6)$$

$$\xi_4 = 0.21 \ln p + 0.078 \quad \text{且 } 40 \leq s \leq 100 \quad (7)$$

$$\xi_5 = 0.1\beta + 0.7 \quad \text{且 } 2 \leq \beta \leq 3 \quad (8)$$

$$\xi_6 = 0.002l_W + 0.82 \quad \text{且 } 40 \leq l_W \leq 90 \quad (9)$$

式中, F_{pm} 为CFRP筋的极限荷载(kN); t 为铝套管厚度(mm); h 为凹齿深度(mm); s 为凹齿间距(mm); p 为夹片预紧力(kN); β 为锚杯倾角($^{\circ}$); l_w 为锚杯长度(mm); ξ_1 为铝套管厚度修正系数; ξ_2 为凹齿深度修正系数; ξ_3 为凹齿间距修正系数; ξ_4 为夹片预紧力修正系数; ξ_5 为锚杯倾角修正系数; ξ_6 为锚杯长度修正系数。

图17为复合式锚具极限荷载的实测值与预测值比较。可以看出复合式锚具的极限荷载的实测值与预测值吻合较好,验证了复合式锚具极限荷载的计算式具有较好的适用性。

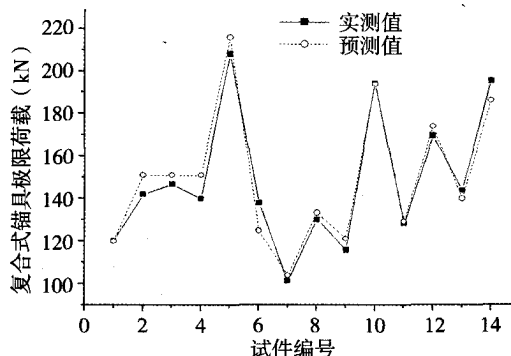


图17 复合式锚具极限荷载的实测值与预测值比较

6 小结

通过试验结果的分析,可以得到以下结论:

(1) 试验表明,当锚杯长度为60mm、粘结锚固长度为100mm、夹片预紧力为60kN时,复合式锚具的极限荷载最大,其值为208kN,对应的锚固效率系数为104%,大于95%,满足规范要求。

(2) 结果表明,复合式锚具两种锚固形式的较合理锚固长度组合为:对于未预张拉锚具,锚杯长度40mm以及粘结锚固长度100mm;对预张拉锚具,可取锚杯长度60mm以及粘结锚固长度60mm。

(3) 筋材进行张拉工艺可以发挥两个作用:其一可有效发挥锚具后部夹片式部分的作用,其二可使筋材的回缩力传递到粘结界面,以期达到抵消使用状态下的部分张拉荷载,从而提高粘结部分的锚固性能,进一步缩短锚固长度。

(4) 锚杯长度、粘结锚固长度、夹片预紧力以及预张拉力等试验参数越大,复合式锚具的极限荷载越大,相同荷载对应的CFRP筋和夹片滑移量越小。

(5) 复合式锚具的荷载滑移曲线上升段与夹片式锚具的荷载滑移曲线上升段基本一致,且相同荷载下复合式锚具的CFRP筋的滑移比夹片

式锚具的CFRP筋滑移小。复合式锚具的荷载滑移曲线下降段与粘结式锚具的荷载滑移曲线下降段基本一致。

(6) 试验结果表明,环向应力最大值发生在钢套筒与锚杯交界位置,并逐渐向加载端和自由端减小;轴向应力最大值发生在张拉端。

(7) 提出的复合式锚具极限荷载计算式具有较好的适用性。

参考文献

- [1] Deskovic, N., Triantafillou, T.C. Innovative design of FRP combined with concrete: short-term behavior. Journal of Structural Engineering[J]. ASCE, 1995, 121(7): 1069-1078
- [2] Sami Rizkalla, Pierre Labossiere. Planning for a new generation of infrastructure: Structural Engineering with FRP in Canada. Concrete International[J]. ACI, 1999, 25-28
- [3] Nanni, A., Bakis, C. E., Dixon T.O. Performance of FRP tendon-anchor systems for prestressed concrete structures[J]. PCI Journal, 1996, 41(1): 34-43.
- [4] 蒋田勇, 方志. CFRP预应力筋夹片式锚具的试验研究[J]. 土木工程学报. 2008, 41(2):60-69 (Jiang T Y, FANG Z. Experimental investigation on wedge-type anchors for CFRP tendons [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(2): :60-69 (in Chinese))
- [5] 方志, 蒋田勇, 梁栋. CFRP筋在活性粉末混凝土中的锚固性能[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2007, 34(7): 1-5 (Fang Z, Jiang T Y, Liang D. Anchorage behavior of CFRP tendons in RPC [J]. Journal of Hunan University Natural Sciences, 2007, 34(7):1-5. (in Chinese))
- [6] 方志, 梁栋, 蒋田勇. 不同粘结界质中CFRP筋锚固性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(6):47-51 (Fang Z, Liang D, Jiang T Y. Experimental investigation on the anchorage performance of CFRP tendon in different bond mediums [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(6):47-51 (in Chinese))
- [7] 唐小萍. 平行钢绞线索索与平行钢丝拉索的特性、经济性比较分析[J]. 桥梁建设, 1997,(4):17-19 (Tang X P. Comparative analysis of the characteristic and economics between the parallel strand stayed cable and the parallel wire stayed cable [J]. Bridge construction, 1997,(4):17-19(in Chinese))
- [8] 唐明翰, 李义. 现代斜拉索[J]. 桥梁建设, 1997, (4):29-32 (Tang M H, Li Y. Modern stayed cable [J]. Bridge construction, 1997,(4) :29-32 (in Chinese))
- [9] 经柏林, 谢华鸾. 斜拉桥拉索研究综述[J]. 中国市政工程. 2003, (6):19-21 (Jing B L, Xie H L. A study on cable of cable-stayed bridge [J]. China Municipal Engineering, 2003, (6):19-21 (in Chinese))
- [10] 杨进, 华有恒. 汕头石大石大桥主桥斜拉索选型及锚固方案[J]. 桥梁建设, 1997,(4):13-16 (Yang J, Hua Y H. Form selections of stayed cables of the major bridge of shantou qieshi bridge and its anchorage plan [J]. Bridge construction, 1997,(4) (4):13-16 (in Chinese))
- [11] Ezzeldin Y, Sayed A, Nigel G S. A new steel anchorage system for post tensioning applications using carbon fibre reinforced plastic tendons. Can. J. civ. Eng. 1998, 25:113-127
- [12] 蒋田勇. 碳纤维预应力筋及拉索锚固系统的试验研究和理论分析[D]. [湖南大学博士论文]. 长沙, 湖南大学, 2008 (JIANG Tianyong. Experimental and Theoretical Investigation on the Anchorage System for CFRP Tendons[D]: [The degree of Doctor of Philosophy, Hunan University]. Changsha, Hunan University, 2008)
- [13] 中华人民共和国交通行业标准(JT329.2-1997). 公路桥梁预应力钢绞线用锚具、连接器试验方法及检验规则[S]. 北京: 人民交通出版社, 1997 (Standard issued by Ministry of Communication of China (JT329.2-1997). Test method and inspect rules of prestressing strand anchorage and coupler for highway bridge [S]. Beijing: China Communications Press (in Chinese))