

基于摩擦力修正的钢桥面刚性铺装环氧树脂黏结层抗剪性能研究

向磊^{1,2},王欢^{1,2}

(1.上海市市政规划设计研究院有限公司,上海市 200031;2.上海城市路域生态工程技术研究中心)

摘要: 为了研究钢桥面刚性铺装环氧树脂黏结层抗剪性能,通过多角度斜剪试验测试不同工况下的层间抗剪强度。基于摩擦力修正对试验数据进行处理,分析受剪角度、温度对环氧树脂黏结层抗剪强度,以及正应力与剪应力之间的数值关系。结果表明:由于摩擦力的存在,试验得到的名义抗剪强度大于实际抗剪强度,需要考虑基于摩擦力进行修正;考虑摩擦力修正后的环氧树脂黏结层正应力与剪应力在所有试验温度下均存在良好的线性关系,符合摩尔-库仑理论;环氧树脂黏结层抗剪强度随温度升高降幅明显,随受剪角度增大则降幅较小;在剪切角度变大的过程中,摩擦系数充当了阻碍抗剪强度降低的作用,摩擦系数如果过大,将导致计算出的名义抗剪强度偏高,错误评价黏结材料抗剪性能,因此在试验中应尽可能消除摩擦力的影响。

关键词: 摩擦力修正;钢桥面刚性铺装;环氧树脂黏结层;抗剪性能

1 前言

钢桥面刚性铺装指采用超高性能混凝土(以下简称UHPC)作为保护层,在其上铺设磨耗层的一种结构形式,UHPC与钢桥面板之间采用局部焊钉和环氧树脂防水黏结层的弱连接形式,焊钉仅在UHPC边缘处设置以限制混凝土的收缩和滑移。钢桥面铺装工程中,因防水黏结层剪切和剥离破坏带来的病害最为突

出,包括铺装层的脱皮、开裂、推挤、拥包和钢桥面板的锈蚀,这些病害致使大桥的养护成本增加,并影响结构的耐久性。UHPC与钢桥面板之间防水、防腐、协同变形性都需要依靠环氧树脂层来实现,因此,环氧树脂层性能的好坏至关重要。村越润等研究认为,钢桥面刚性铺装黏结层的主控指标为抗剪强度,拉拔强度主要作为补充试验来验证施工质量,这也与黏结层受力破坏特性相一致。

李正中等利用室内斜剪试验模拟水泥混凝土桥面

- *****
- [2] 李士中. 下穿京沪铁路南京站咽喉区大孔径框架桥设计与施工[J]. 铁道建筑,2019(11).
- [3] 刘洪亮,魏庆,李克银. 顶进框构桥既有有线加固计算分析[J]. 城市道桥与防洪,2015(4).
- [4] 张蓐. 顶进框构桥纵横梁加固法设计分析与应用[J]. 铁道建筑,2018(6).
- [5] 李家稳,孙先委,王峰峰. 框架桥下穿既有铁路施工风险监控研究[J]. 铁道标准设计,2019(1).
- [6] 崔陆林. 下穿陇海铁路线修建顶进框架桥施工技术探讨[J]. 黑龙江科技信息,2015(16).
- [7] 王兴睿. 道路下穿铁路框架桥顶进施工关键技术[J]. 山西建筑,2019(7).
- [8] 李岩. 市政框构桥下穿多股铁路线顶进施工技术[J]. 城市理论建设研究(电子版),2016(31).
- [9] 郑文豪. 探讨下穿铁路框架桥的顶进施工技术[J]. 建材与装饰,2018(49).
- [10] 谢庆仕. 顶管施工工作中的核心要点探讨[J]. 工程建设与设计,2020(3).
- [11] 陈彬科,陈林杰,吴建辉,等. 新建地铁下穿既有轨道交通施工方案研究[J]. 中外公路,2018(6).
- [12] O'Neill, M. W., and Reese, L. C. Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods, Publication No. FHWA-IF-99-025, Federal Highway Administration, Washington D. C., 1999.
- [13] 沈阳铁路局工务处. 铁路工务技术手册:轨道[M]. 北京:人民铁道出版社,1979.

防水黏结层的界面受力状态,从沥青喷涂量、碎石撒布类型、桥面板界面处理状况、环境温度等方面系统分析影响其层间抗剪性能的各种因素及变化规律;田帅等通过直剪试验评价加铺碳纤维的桥面板与桥面铺装结构层间的抗剪强度是否满足要求;贾锦绣利用 HS—SS I 型道路直剪试验仪测得位移和剪应力,并建立剪应力—剪应变关系曲线,分析层间抗剪能力的稳定性;李惠婷建立斜剪试验有限元模型,研究了层间受剪薄弱面以及模量、荷载变化对层间剪应力的影响;李忠林等利用界面力学中的黏结滑移理论,对层间界面荷载—滑移曲线展开分析,将其分为 4 个受力阶段并给出了各阶段的拟合曲线,分析了层间黏结强度的形成机理;赵峰军等提出采用叠层梁作为桥面沥青铺装层间应力计算的简化模型,在此基础上推导出简支叠层梁层间应力计算公式,并利用有限元计算结果验证了简化模型的准确性与合理性;胡涛等通过室内多角度斜剪试验,提出了更加贴近实际桥面铺装现状的层间黏结强度评价方法及评价指标。

中国研究评价黏结层抗剪性能的试验方法由早期的直剪试验逐渐演变为现在的斜剪试验,并已形成规范,试验方法更加简便,但试验结果的处理却忽略了摩擦力的影响。规范推荐试验做法是增加滑轮,将滑动摩擦转变为滚动摩擦进而减小摩擦力的影响,但这样的做法依然存在摩擦力,使得抗剪强度的计算值偏大,

并且对于抗剪强度较高的材料,例如环氧树脂、MMA 树脂等,滑轮往往难以承受压力机荷载而不得不采用钢板表面涂抹润滑剂的形式来替代,这又将增大摩擦系数,影响试验结果。该文将开展不同温度下多角度斜剪试验,并考虑摩擦力的影响,研究刚性铺装环氧树脂黏结层的抗剪性能。

2 原材料

2.1 超高性能混凝土(UHPC)

试验所用 UHPC 集料为 0~3 mm 连续级配玄武岩碎石,水泥采用 52.5 级普通硅酸盐水泥,钢纤维采用 0.18~0.22 mm 散丝,混凝土配比如表 1 所示。

表 1 超高性能混凝土配比

材料用量/(kg·m ⁻³)					水胶比
水泥	硅灰	砂	钢纤维	减水剂	
900	150	1 000	200	8	0.2

2.2 环氧树脂

环氧树脂胶为双组分材料,A 组分是单纯的低分子量高环氧值的环氧树脂,B 组分是固化剂,成分是脂肪族或者芳香族胺。A、B 组分性能及混合后环氧树脂性能分别见表 2~4。

表 2 A 组分性能

试验项目	单位	测试值	技术要求	试验方法
黏度(25℃)	mPa·s	11 236	8 000~16 000	GB/T 22314—2008
环氧当量		205	195~216	GB/T 4612—2008
颜色		3.11	≤4	GB/T 22295—2008
含水量	%	0.03	≤0.1	ASTM D1744
闪点	℃	265	≥240	ASTM D92
密度(25℃)	g/cm ³	1.18	≥1	GB/T 15223—2008
外观		透明琥珀色		

表 3 B 组分性能

试验项目	单位	测试值	技术要求	试验方法
酸值 KOH	mg	89	≤100	T0626—2000
黏度(25℃)	mPa·s	2 115	1 000~4 000	GB/T 12007.4—1989
密度(25℃)	g/cm ³	1.02	≥1	ASTM D1475
含水量	%	0.03	≤0.1	ASTM D1744
闪点	℃	225	≥200	ASTM D92
外观		透明琥珀色		

表 4 混合后环氧树脂性能				
试验项目	单位	测试值	技术要求	试验方法
拉伸强度(23 ℃)	MPa	4.11	≥3.0	GB/T 16777—2008
断裂伸长率(23 ℃)	%	113	≥100	
不透水性(0.3 MPa, 24 h)		不透水	不透水	
吸水率	%	0.13	≤0.3	GB/T 1034—2008
黏结强度(与钢板, 25 ℃)	MPa	5.30	≥3.0	JTG/T 3364—02—2019
黏结强度(与 UHPC, 25 ℃)	MPa	3.34	≥2.0	

3 试验方案设计

环氧树脂黏结剂的用量为 1 L/m²,将其均匀涂抹在钢板表面,超高性能混凝土采用专用搅拌机搅拌后浇筑至钢板表面,其后在振动台上振实试件。成型后的 UHPC 截面尺寸为 100 mm×100 mm 正方形,厚度为 50 mm,组合试件示意图见图 1。

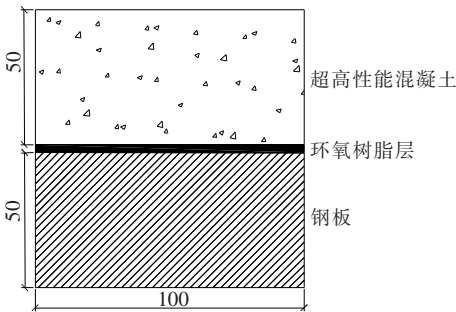


图 1 抗剪试验组合试件(单位:mm)

斜剪试验源自于 JTJ 054—94《公路工程石料试验规程》中的抗剪强度试验 T0215—94。在斜剪试验中,一般采用夹具与压力机接触面上布设滑轮的形式来消除摩擦阻力的影响,但即使由滑动摩擦变为滚动摩擦,接触部分仍存在摩擦系数,因而如果忽略接触面摩擦力的影响必然导致计算出现误差。在环氧树脂黏结层斜剪试验中,由于加载力过大,滑动轮无法承受荷载,试验过程采用在接触面上涂抹润滑油的方式尽量减少摩擦力的影响,通过旋转受荷板可以改变受剪角度,模具及加载形式如图 2、3 所示。在试验加载过程中夹具与压力机之间保持相对静止状态,因此摩擦力修正应考虑静摩擦系数,测出涂油后夹具与压力机接触面摩擦系数 $f_1=0.26$, $f_2=0.37$ (在 30°、45°时 $f_1=0.26$,在 37.5°时 $f_2=0.37$)。结合受剪平面与水平面的斜剪角度 α ,可以将试件的层间抗剪强度 τ 和最大正应力 σ 由压应力的峰值分解得到,计算公式如下:

$$\sigma_a = \frac{P}{A} (\cos\alpha + f \sin\alpha)$$
(1)

$$\tau_a = \frac{P}{A} (\sin\alpha - f \cos\alpha)$$
(2)

式中: σ 为正应力(MPa); τ 为层间抗剪强度(MPa); P 为荷载峰值(N); A 为受力面积(mm²); α 为斜剪角度(°); f 为夹具与压力机接触面静摩擦系数。

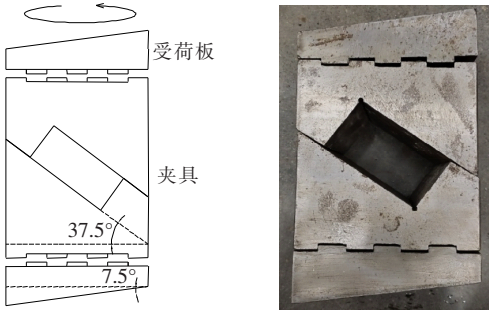


图 2 斜剪试验夹具示意图



图 3 $\alpha=37.5^\circ$ 试验加载示意图

4 试验结果分析

考虑到实际钢桥面工作温度,采用 25、50、70 ℃作为试验温度,将成型好的试件分别置于室温环境、50 ℃烘箱、70 ℃烘箱中保温 5 h,保温结束后取出并立即进行试验。参照 JTG/T 3364—02—2019《公路钢桥面铺装设计与施工技术规范》中的要求,加载速率采用 10 mm/min,调整夹具使受剪角度呈 30°、37.5°、45°,加载直到破坏为止,试验结果如表 5 所示。

表 5 抗剪强度试验结果

试验温 度/℃	受剪角 度/(°)	抗剪强度/MPa						平均值/ MPa
		1	2	3	4	5	6	
25	30.0	145.13	96.39	155.05	179.25	225.56	264.51	177.65
	37.5	181.76	136.86	155.80	123.30	151.26	146.33	149.22
	45.0	45.77	87.27	90.10	86.07	84.88	107.71	83.63
50	30.0	39.74	40.12	98.50	48.20	51.43	53.80	55.30
	37.5	32.88	44.99	27.75	24.28	50.84	29.94	35.11
	45.0	14.13	21.84	12.67	17.36	16.12	19.59	16.95
70	30.0	19.20	19.61	30.23	22.14	43.80	32.45	27.91
	37.5	21.20	14.41	13.99	18.61	16.83	23.97	18.17
	45.0	8.91	7.23	7.51	7.72	9.01	7.41	7.97

根据上述公式对表中的试验结果进行处理,得到各工况下层间抗剪强度以及正应力值,如表 6 所示。

表 6 不同温度下层间抗剪强度与正应力

斜剪角 度/(°)	最大正应力/MPa			最大剪应力/MPa		
	25℃	50℃	70℃	25℃	50℃	70℃
30.0	17.77	5.53	2.48	4.87	1.51	0.68
37.5	15.22	3.58	1.86	4.77	1.12	0.58
45.0	7.44	1.51	0.71	4.43	0.90	0.42

4.1 层间抗剪强度与正应力关系分析

将 25℃下各斜剪角度计算出的抗剪强度与正应力进行拟合,得到两者关系如图 4 所示。

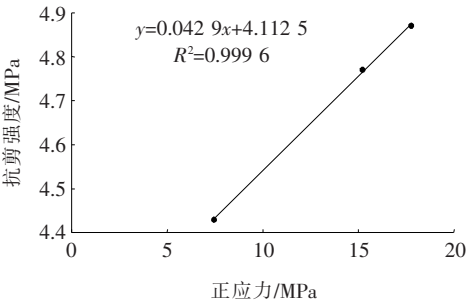


图 4 25℃正应力与剪应力关系

由图 4 可以看出:抗剪强度与正应力之前存在良好的线性关系,符合摩尔—库仑理论中对于抗剪强度与正应力之间关系的描述,即:

$$\tau=c+\sigma_z\tan\varphi \tag{3}$$

式中: c 为黏结材料的黏聚力; φ 为黏结材料的内摩擦角; σ_z 为破坏时的法向正应力。

因此,通过数据拟合可以得出在 25℃下抗剪强度—正应力之间的数值关系:

$$\tau=0.043\sigma+4.113 \tag{4}$$

在 25℃时, $c\approx 4.113$ MPa, $\varphi=2.4^\circ$ 。在该试验温度下,改变斜剪角度使正应力增大的同时,也将同时增大抗剪强度,并且两者呈线性关系。

同理,分析 50、70℃下抗剪强度与正应力之间的关系,通过拟合验证出环氧树脂黏结材料在 50、70℃下仍满足摩尔—库仑理论,数值关系式如下:

$$\tau=0.151\sigma+0.641, 50^\circ\text{C} \tag{5}$$

$$\tau=0.146\sigma+0.314, 70^\circ\text{C} \tag{6}$$

在 50℃时, $c=0.641$ MPa, $\varphi=8.6^\circ$;在 70℃时, $c=0.314$ MPa, $\varphi=8.3^\circ$ 。随着温度的升高, c 值也就是环氧黏结剂的黏聚力逐渐减小,说明环氧树脂黏结层随着温度的升高,黏结强度逐渐降低,同样的铺装结构,在高温重载条件下更容易发生层间破坏,尤其是在上下坡路段以及紧急刹车发生时,同时会产生大挠度变形的 U 肋加劲肋位置处的铺装层也会产生较大剪应力,影响铺装结构使用寿命。

4.2 层间抗剪强度与温度、剪切角度的关系

为了分析温度对环氧树脂黏结层抗剪强度的影响,将 3 种温度下不同剪切角度的数值进行对比,结果如图 5 所示。

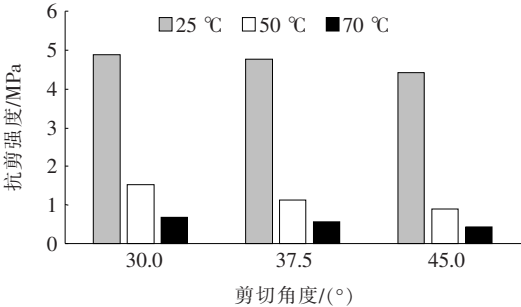


图 5 抗剪强度与剪切角度关系

在 25℃ 时,抗剪角度由 30° 增加至 37.5°、45° 抗剪强度降低幅度较小,分别为 2.1%、9.0%;在 50℃ 时,抗剪强度因抗剪角度增加而降低的幅度分别为 25.8%、40.4%;在 70℃ 时,抗剪强度因抗剪角度增加而降低的幅度分别为 14.7%、38.2%。在高温环境下,抗剪强度的降低受抗剪角度的影响更为明显,这也解释了高温炎热季节钢桥面铺装上下坡段易发生脱层病害。

无论剪切角度是多少,从 25℃ 升至 50℃ 过程中,层间抗剪强度降低幅度几乎都在 70% 以上,从 50℃ 升至 70℃ 过程中,层间抗剪强度降低幅度几乎都在 50% 以上,这说明环氧树脂黏结剂仍是一种温度敏感性材料,受温度变化影响大。

4.3 摩擦系数对层间抗剪强度影响分析

在 25℃ 下,剪切角度由 30° 增加至 45°,加载力下降幅度约为 52.92%,抗剪强度下降幅度仅为 9.03%;同理在 50、70℃ 时,对应加载力下降幅度为 69.35%、71.44%,抗剪强度下降仅为 40.40%、38.24%。这可以看成是在剪切角度变大的过程中,摩擦系数充当了阻碍抗剪强度降低的作用,摩擦系数如果过大,将导致计算出的名义抗剪强度偏高,错误评价黏结材料抗剪性能,因此在试验中应尽可能消除摩擦力的影响。

由计算公式可以看出:不考虑摩擦系数计算得出名义抗剪强度大于实际抗剪强度,现阶段剪切试验采用的剪切角度基本均为 45°,则可以通过代入数值的方法得出实际剪切强度与名义剪切强度的关系如下所示:

$$\tau_{\text{实}} = \Delta f \times \tau_{\text{名}} \quad (7)$$

$$\Delta f = 1 - f \quad (8)$$

式中: $\tau_{\text{实}}$ 为实际抗剪强度(MPa); $\tau_{\text{名}}$ 为名义抗剪强度(MPa); Δf 为摩擦力修正系数; f 为夹具与压力机接触面静摩擦系数。

5 结论

考虑钢桥面铺装各种状态下黏结层的受力状态,通过改变受剪角度和环境温度的方式开展多角度斜剪试验,利用实测得到的受荷板与加载设备间的摩擦系数进行抗剪强度修正,并分析正应力与剪应力间的关系,得出以下结论:

(1) 由于摩擦力的存在,试验得到的名义抗剪强度大于实际抗剪强度,尤其是对于环氧树脂、MMA 树脂等强度较大的黏结剂,必须用润滑剂的形式来替代滑轮,则需考虑摩擦力修正系数 Δf 。

(2) 考虑摩擦力修正后的环氧树脂黏结层正应力与剪应力在所有试验温度下均存在良好的线性关系,符合摩尔-库仑理论。

(3) 环氧树脂仍是一种温度敏感性材料,在 25℃ 升至 50℃ 过程中所有剪切角度的抗剪强度均减小 70% 以上,在 50℃ 升至 70℃ 过程中所有剪切角度的抗剪强度均减小 50% 以上。

(4) 环氧树脂黏结层抗剪强度随着受剪角度的增大而逐渐降低,但考虑摩擦力修正的情况下降幅并不大。

(5) 在剪切角度变大的过程中,摩擦系数充当了阻碍抗剪强度降低的作用,摩擦系数如果过大,将导致计算出的名义抗剪强度偏高,错误评价黏结材料抗剪性能,因此在试验中应尽可能消除摩擦力的影响。

参考文献:

- [1] 村越润,木ノ本剛,春日井俊博,等. 既設鋼床版のSFRC 舗装による補強工法と耐久性評価に関する実験的検討[J]. 土木学会論文集 A1(構造・地震工学),2013(3).
- [2] 李正中,宋晓燕,肖庆一,等. 橡胶沥青防水粘结层层间抗剪性能试验分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2012(6).
- [3] 田帅,张铁志,李野,等. 加铺碳纤维桥面板与桥面铺装结构层间剪切试验研究[J]. 武汉理工大学学报,2011(6).
- [4] 贾锦绣. 沥青路面与桥面铺装抗剪特性研究[D]. 长安大学博士学位论文,2011.
- [5] 李惠婷. 水泥混凝土桥面沥青铺装层剪切试验研究[D]. 大连理工大学硕士学位论文,2008.
- [6] 李忠林,凌天清,王火明,等. 粘结滑移理论在桥面铺装层间受力分析中的应用[J]. 华东公路,2008(6).
- [7] 赵峰军,李宇峙,易伟健. 桥面沥青铺装层间应力分析简化模型[J]. 土木工程学报,2007(6).
- [8] 胡涛,资建民,金思佳. 基于多角度斜剪试验的桥面铺装抗剪性能[J]. 土木工程与管理学报,2019(1).
- [9] JTJ 054—94 公路工程石料试验规程[S].
- [10] JTG/T 3364—02—2019 公路钢桥面铺装设计与施工技术规范[S].