

DOI:10.11918/201910033

环氧胶粘结刚性铺装的正交异性桥面板力学性能

贺欣怡¹, 苏庆田¹, 姜旭¹, 曾明辉², 俞文生²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 江西省高速公路投资集团有限公司, 南昌 330025)

摘要: 为了研究环氧胶在钢-混组合板中作为粘结层的适用性, 以无配筋的超高性能混凝土作铺装层的钢桥面板为对象, 采用环氧胶层连接两种材料, 并考虑钢板表面处理不佳的涂胶情况, 通过试验测试施涂效果欠佳的钢混胶接头的抗剪强度, 并采用该种环氧胶的施涂方式, 设计制作一个足尺桥面板试件, 进行受弯加载试验. 测试试件的变形、结构不同位置的应变响应以及极限承载力等, 记录钢混粘结层的失效状态, 并采用有限元方法对失效前的钢与混凝土之间粘结层的受力进行分析. 结果表明: 该种环氧结构胶作为无配筋刚性铺装钢桥面板的粘结层时, 施工操作方便; 钢板表面处理效果影响到粘结层的强度; 即便在钢板表面处理不佳情况下涂刷环氧胶, 也能很好地保证钢板与刚性铺装层之间的可靠连接, 钢结构材料屈服先于钢与混凝土之间环氧胶层的破坏; 粘结层的纵向剪应力分布不均匀, 在加劲肋与顶板交界处的应力大于其他位置; 采用环氧胶粘结的刚性铺装桥面板具有较好的延性和较高的承载力.

关键词: 刚性铺装; 环氧结构胶; 静力试验; 受力性能; 正交异性钢桥面板

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2020)09-0025-07

Mechanical properties of orthotropic steel deck with epoxy adhesively bonded rigid pavement

HE Xinyi¹, SU Qingtian¹, JIANG Xu¹, ZENG Minghui², YU Wensheng²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Jiangxi Provincial Expressway Investment Group Co., Ltd., Nanchang 330025, China)

Abstract: To study the workability of epoxy adhesive used as bonding layer in steel-concrete composite deck, a steel deck with pavement casted by unreinforced ultra-high performance concrete was chosen as research object, and an epoxy layer was introduced to connect the two materials. In the process of adhesive applying, the situation of poor pretreatment of steel surface was considered. A static test was conducted to evaluate the cohesive shear strength of the steel-concrete composite joint, and a full-scale deck specimen adopting the same adhesive bonding method was designed and tested under bending loads. The mechanical behaviors of the specimen were investigated, which include deflection of specimen, strain at different positions, and ultimate bearing capacity. The failure modes of the bonding layer were recoded, and the strain of the bonding layer before failure was analyzed by finite element method. Results show that epoxy adhesive was convenient for construction as a bonding layer between unreinforced rigid pavement and steel deck, and surface pretreatment of steel had influence on the bonding strength. The epoxy bonding ensured a reliable connection between the steel deck and the rigid pavement even with a poor pretreatment of the steel surface. Steel yielding occurred prior to the cohesive failure between the steel and the concrete. In addition, the bonding layer had a non-uniform shear stress distribution that the stress at the rib-to-deck joint was higher than other positions. The steel deck with adhesively bonded rigid pavement exhibited good ductility and high bearing capacity.

Keywords: rigid pavement; epoxy adhesive; static test; mechanical behavior; orthotropic steel deck

正交异性钢桥面板由于其自重轻、强度大的特点成为大跨度桥梁中的主要桥面形式^[1]. 但在长期运营中, 存在钢结构疲劳开裂和桥面板铺装破坏两大病害^[2], 前者主要是由面板刚度小、焊接残余应力、轮载局部产生高应力、结构局部缺陷等原因引

起^[3-4], 后者也可归因于钢桥面板刚度小、局部变形大^[5]. 对此, 国内外学者提出了混凝土刚性铺装, 通过连接件使钢板与刚性铺装共同受力, 以提高桥面板刚度、减小局部变形、降低板件的应力, 从而提升抗疲劳性能, 减少钢桥面板的病害^[6]. 通常采用50~80 mm厚的高性能或超高性能混凝土作为刚性铺装层^[7-9]. 此类混凝土普遍加掺钢纤维, 以期改善早期收缩引起的开裂, 提高耐久性, 降低维护费用^[10]. 刚性铺装的补强作用, 受钢-混连接方式的影响, 目前

收稿日期: 2019-10-08

基金项目: 国家自然科学基金(51978501)

作者简介: 贺欣怡(1991—), 男, 博士研究生;

苏庆田(1974—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 姜旭, jiangxu@tongji.edu.cn

有两类连接方式:一类为机械式,如焊钉^[6];一类为胶接式,如环氧结构胶或环氧砂浆等^[11]. 焊钉连接技术成熟,可使钢板与混凝土牢固连接在一起,但混凝土在焊钉附近受力明显大于远离焊钉处,导致界面上传力不连续,另外由于焊钉焊接在钢板上也不利于桥面翻新维修. 结构胶相比机械式连接,其耐久性易受环境温度、湿度的影响^[12],但在钢板和混凝土之间采用结构胶连接时,粘接层属于面连接,钢-混层间传力更连续均匀,少有应力集中^[13]. 此外,在钢桥面板与混凝土之间采用结构胶,不仅现浇施工方便,还便于预制,且在后期桥面返修时桥面清除要比焊钉连接形式更容易施工.

采用无配筋的超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete, 以下简称 UHPC) 作为刚性铺装层, UHPC 抗拉强度可达到 10 MPa 以上^[10], 不再额外配筋情况下已具有较高抵抗开裂的能力, 在桥梁中使用不配筋高性能混凝土作为刚性铺装具有较好的应用前景. 特别是不配筋高性能混凝土与钢桥面板之间采用结构胶粘结后将极大方便现场施工, 不论对于新建桥梁的桥面板还是旧桥翻新破损的桥面板, 都具有较好的应用价值. 鉴于目前对结构胶粘接刚性铺装的正交异性桥面板研究还鲜有开展, 本文通过试验测试了刚性铺装与钢桥面板之间结构胶抗剪强度, 并通过抗弯试验测试了环氧结构胶粘接刚性铺装的组合桥面板的受力性能, 评价了环氧结构胶的粘结效果, 为推广使用环氧胶粘结刚性铺装的正交异性桥面板提供了基础资料.

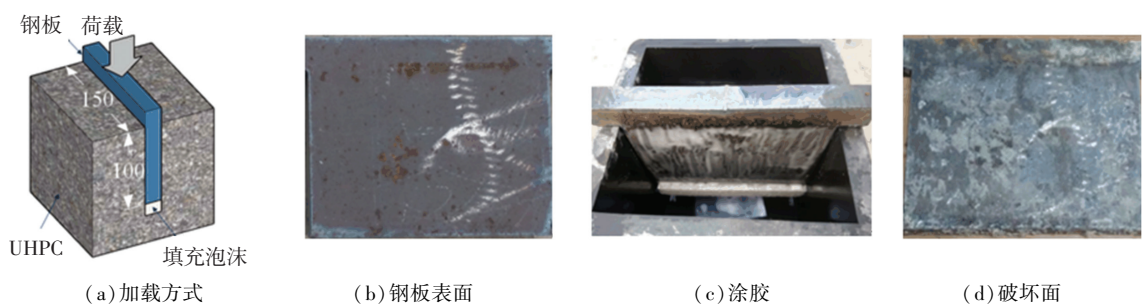


图 1 粘结面剪切试验

Fig.1 Shear strength test on bonding interface

环氧结构胶连接的钢-混凝土接头的抗剪强度按照“荷载大小/受剪面积”计算, 6 个试件的平均抗剪强度为 2.1 MPa, 最低 1.8 MPa, 大大低于严格进行表面处理后的界面连接强度 4.43 MPa^[14], 也再次证明钢板表面处理效果会明显影响粘结强度. 环氧胶应用于钢板与其他材料的连接时, 一般要求严格的喷砂除锈清污, 本次试验的钢结构表面处理方式考虑的是实际施工质量较差的情况, 该试验结果可视为实际施工时粘结强度的下限参考值.

1 环氧胶界面抗剪强度

本文提出的刚性铺装桥面板, 采用 KONISHI E200 环氧树脂胶作为粘结层. 该结构胶硬化后, 胶材自身的抗压强度大于 70 MPa, 抗拉强度大于 10 MPa, 弹性模量大于 1 500 MPa. 该胶用于钢板-钢纤维混凝土间的粘结层时, 钢板表面进行严格喷砂除污迹处理, 涂胶层厚 1 mm, 在 20 °C 下进行受剪试验, 得到钢混连接面的剪切强度为 4.43 MPa, 并表现为钢板与环氧胶之间的界面破坏^[14]. 而用于普通混凝土 (强度等级 C50) 与钢板间的连接时, 破坏形态为混凝土与环氧胶粘结层附近的混凝土破坏, 说明结构胶的强度已经超过了混凝土的强度.

考虑到实桥施工时可能存在不确定性, 钢表面处理未必能达到设计规定的粗糙度要求, 所以本文特意选择钢板表面进行普通处理 (未抛砂处理, 仅手工简略打磨除锈) 的情况, 进行了类似文献 [14] 中的剪切强度试验. 本文的混凝土采用 UHPC, 其类似钢纤维混凝土的高强度可保证混凝土不先于胶接面被剪坏.

试验方案如下: 制作边长为 150 mm 立方体混凝土试块, 中间放置 20 mm 厚的钢板, 涂有环氧结构胶的受剪面为 150 mm×100 mm, 共 6 个试件. 加载方式如图 1(a) 所示. 钢板表面处理情况、涂刷环氧胶情况如图 1(b)、1(c). 最终 6 个试件破坏形式相似, 均为钢板与结构胶层之间的破坏, 破坏界面如图 1(d) 所示.

2 受弯试验设计

2.1 试件设计制作

本文设计制作了 1 个采用环氧胶作为粘结层的刚性铺装桥面板试件, 命名为 S-P. 钢结构采用工程中常用的形式, 其中钢顶板厚度为 16 mm, 宽度为 1 200 mm; 布置两条间距 600 mm 的 U 肋, U 肋断面尺寸为 300 mm×260 mm×10 mm, 特意选择厚度比常用的 6 mm 或 8 mm 大, 以检验环氧胶粘结层的强

度;刚性铺装层采用 55 mm 厚的不配筋的 UHPC 板,截面具具体尺寸见图 2. 试件设计为简支支承,测试桥面系第二体系下正弯矩荷载作用下的受力性能,长 2 800 mm,支承点间跨径 2 600 mm.

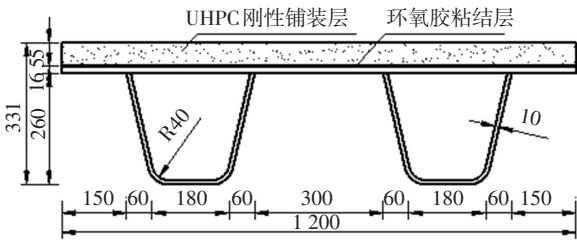


图 2 试件的横截面尺寸 (mm)

Fig.2 Dimension of cross-section of specimen (mm)

加工制作过程主要包括钢结构加工、涂刷环氧胶和混凝土浇筑. 此处钢顶板在涂刷环氧胶前,用钢刷进行手工除锈除杂质,钢板处理效果接近于第 1 节的试验情况;接着涂刷 1 mm 厚的环氧结构胶,涂刷效果见图 3(a);UHPC 采用平直型钢纤维,长 13 mm,直径 0.2 mm,钢纤维体积分数为 2%,钢纤维与拌和后的混凝土如图 3(b)、3(c)所示;本文的 UHPC 采用覆盖土工布浇水的普通养护方式,见图 3(d). 该制作过程可作为该种环氧胶粘结的刚性铺装层实桥施工的参考. 由于不铺设钢筋,环氧胶的涂刷操作方便,并且对于旧桥的加固或刚性铺装日后的修补都十分有利.

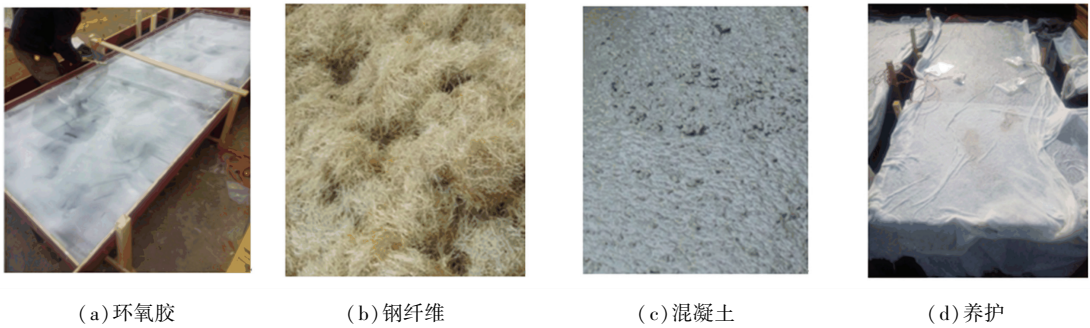


图 3 加工制作过程

Fig.3 Processing and manufacturing

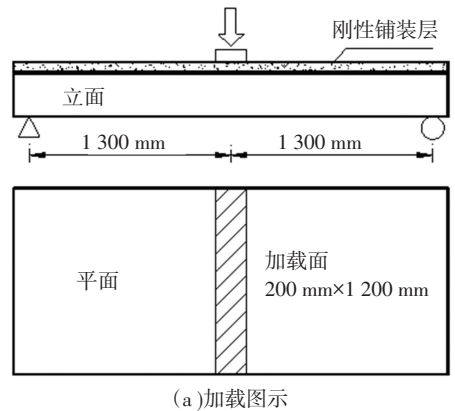
正式加载试验在混凝土养护完成后约 6 个月,确保混凝土完成大部分收缩. 试验前检查混凝土表面,未发现任何初始裂纹,排除了混凝土收缩产生裂缝的可能. 同时检查钢板与混凝土之间的连接情况,没有发现二者之间存在任何分离的情况,说明环氧结构胶粘结 UHPC 刚性铺装层与钢桥面板在外观上是可行的.

2.2 加载方案和测试内容

采用 3 000 kN 的油压千斤顶与分配梁,在跨中施加竖向单调荷载,受荷面积为沿试件纵向宽为 200 mm,横向宽为 1 200 mm. 加载直到试件破坏. 加载方式如图 4(a)所示,试验装置如图 4(b)所示.

为方便描述,试件的两端分别命名为“ A 端”和“ B 端”,如图 5 所示. 主要测试内容包括:1)试件挠曲变形. 在试件的跨中和两端支承的 3 个截面处,各布置两个(合计 6 个)位移计,测量最大竖向挠曲变形,位移计编号以“DISP-”开头,如图 5 所示. 2)钢混界面间相对滑移. 在试件两端钢混交界处安装 4 个水平方向的位移计,测量钢混界面相对滑移,位移计编号以“SLIP-”开头,如图 5 所示. 3)截面纵向应变. 测点布置在两个截面处,其中“截面 1”为跨中,“截面 2”为近“B 端”一侧的 1/4 跨长处,如图 5 所示;测点分布于钢肋底、钢肋腹板中部、钢顶板、混

凝土顶等处,具体布置及测点编号见图 6,编号名中字母*i* = 1 时,为“截面 1”测点,*i* = 2 为“截面 2”测点.



(a)加载图示



(b)试验装置

图 4 加载方案

Fig.4 Loading setup

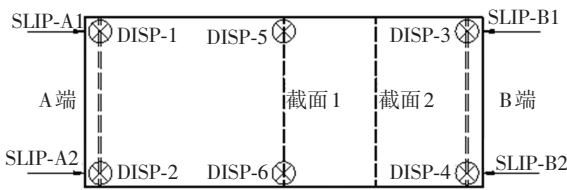


图 5 竖向位移计与滑位移计布置

Fig.5 Layout of vertical displacement and slip displacement gauges

混凝土材料性能采用标准材性试验^[15],测得龄期 28 d 的结果,其平均抗压强度、抗折强度和弹性模量分别为 122、14、53 900 MPa.

3 受弯试验结果

3.1 试验过程及破坏特征

试件 S-P 在加载初期处于弹性工作状态,应变与变形都随荷载线性增加.当荷载加至 1 100 kN 左右,钢截面下缘逐渐进入屈服,之后钢截面的塑性区域扩大,变形逐渐明显.加载至 1 614 kN 时,结构发生剧烈声响,此时在试件的 B 端钢混界面间发生很大的滑移错动,千斤顶荷载暂时回落.随后荷载回复过程中,变形急剧增大,并且跨中加载点下方的混凝土出现开裂.荷载达到 1 700 kN 后变形过大,停止了加载.试件 S-P 最终挠曲变形如图 7(a)所示,混凝土开裂如图 7(b)所示.试件 A 端无滑移, B 端出现较大滑移,终值在 10 mm 以上,如图 7(c)所示.尽管在设计上试件的结构是对称的,但是加工制作误差导致结构受力略微不对称,且粘结层破坏呈脆性,一侧出现破坏会导致另一侧的板层剪力传递出现卸载,从而最终导致试件 B 端的钢与混凝土间滑移而 A 端没有.

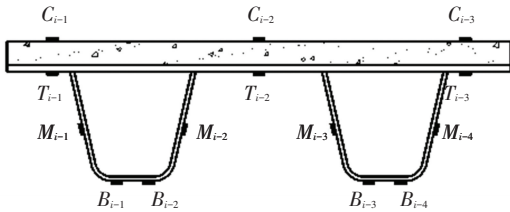
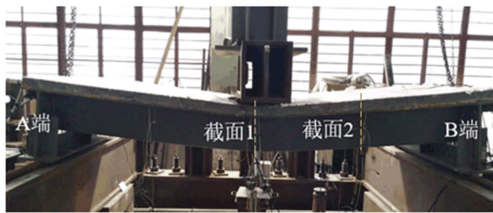


图 6 截面纵向应变测点布置

Fig.6 Layout of measuring points for longitudinal strain at cross section

2.3 材料性能

试件主要受力的钢材板件包括 10 mm 厚的 U 肋和 16 mm 厚的钢顶板,取样测得板材的屈服强度分别为 393、355 MPa,抗拉强度分别为 538、480 MPa.



(a) 挠曲变形



(b) 加载点下方混凝土开裂



(c) B 端钢混界面滑移

图 7 试件 S-P 破坏形态

Fig.7 Failure modes of specimen S-P

3.2 跨中挠度与荷载关系

试件 S-P 的跨中挠度与荷载关系如图 8 所示.试件经历了近似线弹性和明显弹塑性的两个阶段后, B 端在荷载达到 1 614 kN 发生了钢混粘结失效,反应在了位移曲线的转折处,从图中可以看到滑移发生后,变形陡然增大、荷载回落,随后恢复加载的过程中,板的抗弯刚度明显减小,荷载重回 1 600 kN 时变形已超过 70 mm.试件 S-P 在钢板进入屈服前(荷载 1 100 kN)的线弹性变形为 7 mm,钢混粘结失效时变形增加 1.3 倍,约为 16 mm,于此同时荷载提高到 1.4 倍,由此可见此处环氧胶的粘结效果保证了该种刚性铺装的桥面板具有较好的延性.常规的正交异性钢桥面自身已具备很高的极限承载力,环氧胶良好的粘结效果使得刚性铺装钢结构进入屈服后都能完好地与钢板结合,共同承载,可以进一步提高桥面板的刚度,并保证了桥面板在

环氧胶粘结失效前具有极高的承载力.该试验也说明,即便对钢板表面处理较差方式下涂刷环氧结构胶,也能够使得组合桥面板的破坏先发生在钢结构上而不是粘结胶界面上.如果实际工程中在钢板表面处理更加精细的情况下涂刷环氧胶,将进一步保障连接界面的可靠性.

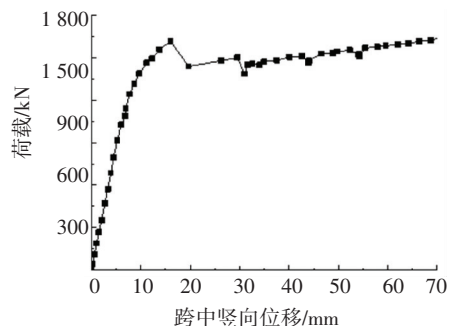


图 8 试件 S-P 跨中挠曲变形

Fig.8 Deflection at mid-span of specimen S-P

3.3 钢混界面滑移

试件 S-P 的滑移曲线如图 9 所示. 从图 9 中可以看到,在荷载达到 1 614 kN 之前,钢混连接效果极好,无滑移. 随后 B 端发生明显滑移错动,A 端无明显变化. 虽然环氧胶本身弹性模量较小,但用于钢混粘结层时,仅厚 1 mm,剪切破坏前的自身变形很小,因此粘结层的滑移破坏具有脆性特征. 在荷载卸落再重回 1 600 kN 过程中,B 端滑移变化情况与前述的挠曲变形类似,都出现了急剧增大.

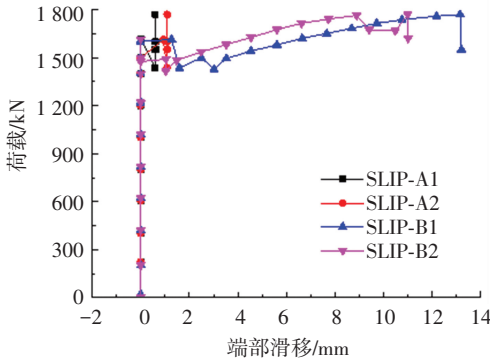


图 9 试件 S-P 荷载-滑移曲线

Fig.9 Load-slip curves of specimen S-P

3.4 应力应变分析

试件 S-P 截面 1(跨中)的应变-荷载曲线如图 10 所示,所取应变为截面同一高度所有测点平均结果,图例 b、m、t、c,分别表示钢截面底、中、顶和混凝土表面位置.

从图 10 中可以看到,试件钢截面底部在 1 100 kN 左右进入屈服,钢肋中部在 1 350 kN 也进入了屈服. 发生滑移时混凝土压应变 $1\ 750 \times 10^{-6}$, 小于抗压强度水平 $2\ 260 \times 10^{-6}$ (按照材性试验抗压强度和弹模换算得到), 但已经达到后者的 77%, 说明该环氧胶的粘结效果足够强, 能较充分地利用高性能混凝土的高强特性. 试件在 1 614 kN 发生脆性的粘结失效时, 其钢截面的应变已经非常大, 大部分已经进入塑性, 未显示在图 10 中坐标范围内.

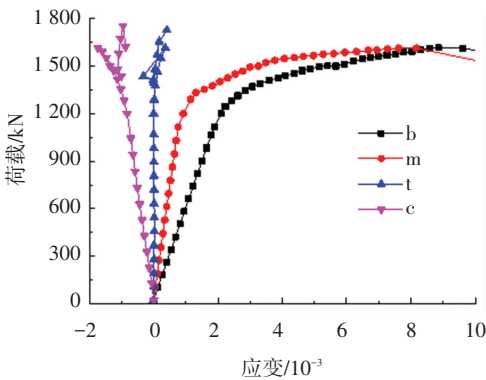


图 10 跨中截面 1 不同高度位置的荷载-应变曲线

Fig.10 Load-strain curves of cross-section 1 at different heights

试件 S-P 截面 2(1/4 跨)的应变在各级荷载下沿截面高度分布的情况,如图 11 所示,图中 F 为荷载大小. 整个加载过程中,截面应变处于弹性范围. 在加载前期,截面应变沿高度分布符合平截面假定, 表现出了钢与混凝土两种材料良好的组合作用. 根据材性试验结果,可计算得到组合截面和钢截面的中性轴距截面底部的高度分别为 236、201 mm. 根据图 11 所示,试件的截面应变在 1 614 kN 前后发生突变,其中性轴从 240 mm 突降到 210 mm,反映了胶结层的脆性破坏特性. 中性轴高度变化也说明了在滑移前的钢混组合效果非常好,接近完全组合受力状态,而滑移发生后钢混层则变为近似叠合的受力状态.

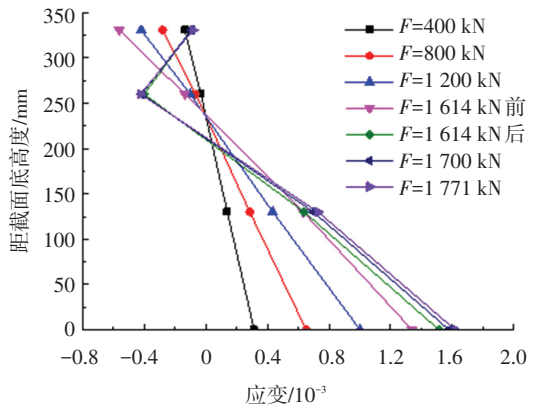


图 11 1/4 跨径的截面 2 应变沿高度分布

Fig.11 Distribution of strain at cross-section 2 along height

由试验结果可知,在钢板表面处理较差、粘结效果不理想、特意加大加劲肋板件厚度的情况下,环氧结构胶在作为本文所提出的刚性铺装钢桥面板的粘结层时,在正弯矩荷载作用下,能够保证钢结构先屈服并有较大范围的塑性变形发展之后才出现环氧胶的剪切破坏. 而在实际结构中,钢结构的设计强度都小于钢材屈服强度的,因此采用环氧胶粘结的钢与混凝土这种结构用在实际结构中具有足够的安全储备,能在较高的承载情况下保持极好的连接作用.

4 粘结面受力计算分析

采用有限元软件 Abaqus 建模,分析试件 S-P 粘结层失效前的受力情况. 根据试验结果,在粘结层发生滑移错动前,混凝土的应力约为抗压强度 77%,此状态的混凝土的应力应变关系可视作线性^[16],故本文有限元模型中的混凝土材性按照线弹性设置,弹性模量取 53.9 GPa. 钢材应力应变关系取双折线模型,包括线性上升段和屈服后的水平段,强度值采用试验测试结果. 环氧胶粘结层通过设置 Abaqus 中接触对 (surface-to-surface contact) 的粘结行为 (cohesive behavior) 进行模拟,根据文献[14]提

供的材料弹性模量为 1 500 MPa, 设置粘结刚度参数 K_{nm} 、 K_{ss} 、 K_{tt} 分别设为 1 500、536、536 N/mm³。根据对称原则建立 1/4 原试件的有限元模型, 钢混凝土都采用实体单元 C3D8R 建立, 如图 12 所示。

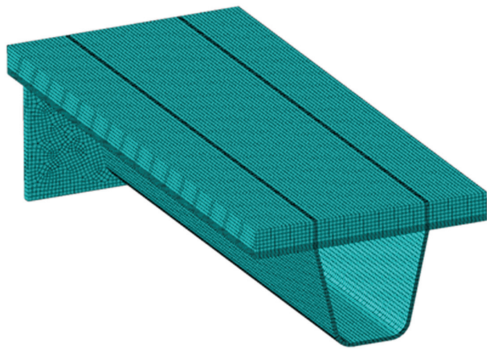


图 12 有限元模型

Fig.12 Finite element model

本文有限元只考虑计算到荷载 1 614 kN(对应粘结失效荷载), 跨中应变及变形的结果与试验对比如图 13 所示, 可以看到有限元(FEM)计算数值与试验结果吻合较好, 说明有限元结果可以反映实际受力情况。

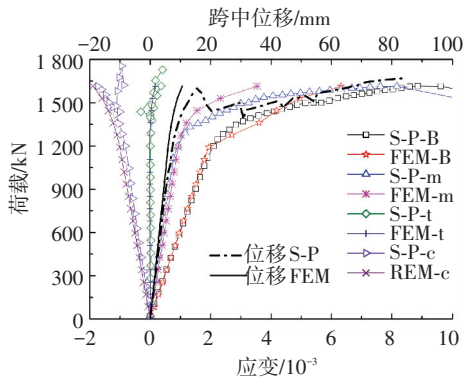


图 13 有限元与试验计算结果对比

Fig.13 Comparison of finite element analysis and test results

荷载为 1 614 kN 时的粘结层纵向剪应力分布, 如图 14 所示。可以看到剪应力沿横向分布并不均匀, 在 U 肋与钢顶板交界处存在明显的峰值; 纵向分布较为稳定, 但在试件跨中加载区域有较大峰值。提取 1/4 跨径处纵向剪应力沿横向位置的分布, 如图 15 所示, 可以看到在肋顶处有接近 4.7 MPa 的峰值, 离开肋顶 50 mm 以外的各处, 应力都在 2 MPa 以下, 通过积分求得平均剪应力为 1.35 MPa, 小于本文第 1 节中试验测得的抗剪强度平均值 2.1 MPa。试件在试验中的该荷载下粘结层已临界破坏, 由此推知, 环氧胶作为正交异性钢桥面的刚性铺装粘结层时, 层内的传力会出现类似“箱梁剪力滞”的效应, 加劲肋与顶板交界处应力大于其他部位的, 此高峰值应力超过粘结层的抗剪强度, 试验中出现的脆

性破坏很有可能就是先从此应力峰值区域发生, 最终使得粘结层在平均剪应力低于抗剪强度的情况下就发生破坏。

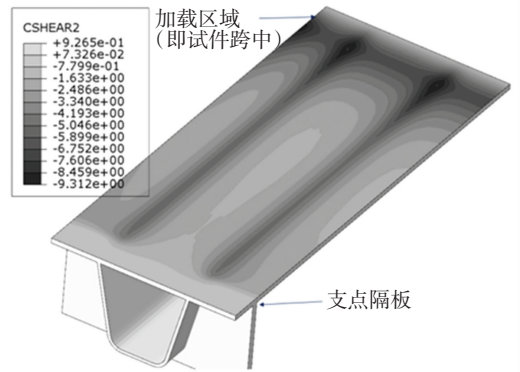


图 14 粘结层纵向剪应力 (MPa)

Fig.14 Longitudinal shear stress of bonding layer (MPa)

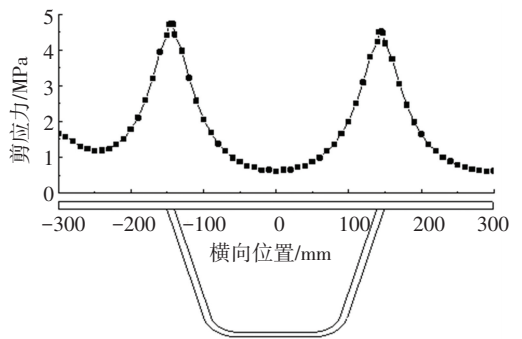


图 15 1/4 跨径面处的纵向剪应力分布 (MPa)

Fig.15 Distribution of longitudinal shear stress at 1/4 cross section (MPa)

限于本文是初次采用环氧结构胶作为刚性铺装的粘结层进行桥面板受力性能的研究, 试验试件少, 没有拓展到其他影响因素, 更加详细的连接性能与破坏机理还有待进一步研究。

5 结 论

1) 采用环氧结构胶粘结不配筋的 UHPC 刚性铺装的钢桥面板, 具有施工操作方便的特点, 并且无收缩裂纹。

2) 钢板表面处理对粘结强度有较大影响, 本文试验模拟实际施工时钢板表面处理不佳的胶接层情况, 在弯矩荷载作用下, 环氧胶依然能够保证钢结构先屈服, 并有较大范围的塑性变形发展之后才出现粘结层的剪切破坏, 表明其可以较好保证钢与刚性铺装层之间的连接。

3) 采用环氧胶粘结的刚性铺装桥面板具有较好的延性和较高的承载力, 并能较充分地发挥 UHPC 层对钢桥面板的抗弯补强, 初步论证本文所用的环氧结构胶可以应用于组合桥面板中。

4) 用于正交异性钢桥面与刚性铺装之间作为

粘结层,受弯时粘结层间剪切应力分布不均匀,横截面上在与U肋相交处的应力高于其他部位,粘结层更详尽的连接机理与影响因素有待进一步研究。

参考文献

- [1] 王春生,付炳宁,张芹,等.正交异性钢桥面板足尺疲劳试验[J].中国公路学报,2013,26(2):69
WANG Chunsheng, FU Bingning, ZHANG Qin, et al. Fatigue test on full-scale orthotropic steel bridge deck [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(2):69. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2013.02.011
- [2] 童乐为,沈祖炎.正交异性钢桥面板静力试验和有限元分析[J].同济大学学报(自然科学版),1997,25(6):617
TONG Lewei, SHEN Zuyan. Static test and finite element analysis of orthotropic steel bridge deck [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 1997, 25(6):617
- [3] LI Z X, CHAN T H T, KO J M. Fatigue damage model for bridge under traffic loading: application made to Tsing Ma Bridge [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2001, 35(1):81. DOI:10.1016/S0167-8442(00)00051-3
- [4] De JONG F B P. Overview fatigue phenomenon in orthotropic bridge decks in the Netherlands [C]// Proceedings of 2004 Orthotropic Bridge Conference. Sacramento, CA: ASCE, 2004:489
- [5] BATTISTA R C, PFEIL M S, CARVALHO E M L. Fatigue life estimates for a slender orthotropic steel deck [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64(1):134. DOI:10.1016/j.jcsr.2007.03.002
- [6] 叶华文,王应良,张清华,等.新型正交异性钢-混组合桥面板足尺模型疲劳试验[J].哈尔滨工业大学学报,2017,46(9):25
YE Huawen, WANG Yingliang, ZHANG Qinghua, et al. Full-scale fatigue test of new steel-concrete composite orthotropic bridge deck [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 46(9):25. DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201611055
- [7] De JONG F B P, KOLSTEIN H. Strengthening a bridge deck with high performance concrete [C]// Proceedings of 2004 Orthotropic Bridge Conference. Sacramento, CA: ASCE, 2004:328
- [8] JUN M, NAOKI Y, HIRONORI I. Research on steel fiber reinforced concrete pavement on orthotropic steel deck as a countermeasure for fatigue [C]// Proceedings of 2008 International Orthotropic Bridge Conference. Sacramento, CA: SEM, 2008:359
- [9] 赵秋,陈平,陈宝春,等.装配式钢-UHPC组合桥面板试设计及性能研究[J].桥梁建设,2018,48(1):97
ZHAO Qiu, CHEN Ping, CHEN Baochun, et al. Study of trial design and performance of assembled steel and UHPC composite bridge deck [J]. Bridge Construction, 2018, 48(1):97. DOI:10.3969/j.issn.1003-4722.2018.01.017
- [10] 陈宝春,季韬,黄卿维,等.超高性能混凝土研究综述[J].建筑科学与工程学报,2014,31(3):1
CHEN Baochun, JI Tao, HUANG Qingwei, et al. Review of research on ultra-high performance concrete [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(3):1. DOI:10.3969/j.issn.1673-2049.2014.03.002
- [11] BUITELAAR P, BRAAM R. Heavy reinforced ultra-thin white topping of high performance concrete for re-strengthening and rehabilitation of structures and pavements [C]// Proceedings of 8th International Symposium on Utilization of High-Strength and High-Performance Concrete. Tokyo: JCI, 2008:1262
- [12] BUDHE S, BANEJA M D, De BARROS S, et al. An updated review of adhesively bonded joints in composite materials [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2017, 72:30. DOI:10.1016/j.ijadhadh.2016.10.010
- [13] JIANG X, KOLSTEIN M H, BIJLAARD F S K. Experimental and numerical study on mechanical behavior of an adhesively-bonded joint of FRP-steel composite bridge under shear loading [J]. Composite Structures, 2014, 108:387. DOI:10.1016/j.compstruct.2013.09.045
- [14] MURAKOSHI J, KASUGAI T, NEMOTO N, et al. Design and construction manual of steel bridge deck reinforcement by using SFRC [R]. Tsukuba: Public Works Research Institute, 2009
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部.普通混凝土力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2002[S].北京:中国建筑工业出版社,2003
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard test method for mechanical properties of ordinary concrete: GB/T 50081—2002[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003
- [16] 杨剑,方志.超高性能混凝土单轴受压应力-应变关系研究[J].混凝土,2008(7):11
YANG Jian, FANG Zhi. Research on stress-strain relation of ultra high performance concrete [J]. Concrete, 2008(7):11. DOI:10.3969/j.issn.1002-3550.2008.07.004

(编辑 魏希柱)