

钢-薄层 UHPC 轻型组合桥面结构疲劳性能研究

赵宇航¹, 曹君辉^{1,2*}

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 风工程与桥梁工程湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082)

摘要: 以含 U 型肋的钢-薄层超高性能混凝土(UHPC)轻型组合桥面结构为对象,开展了稀疏栓钉布置下的组合桥面三点弯曲疲劳试验,研究了栓钉抗剪和薄层 UHPC 抗弯拉、疲劳性能,并进行了剩余强度试验。疲劳试验结果表明,累计经历 3200 万次疲劳加载后,UHPC 顶面的最大裂缝宽度仅为 0.05 mm,且钢-薄层 UHPC 界面未见显著滑移。剩余强度试验表明,UHPC 的名义开裂应力为 15.7 MPa,相较于未经历疲劳试验的类似试件应力降低了 38.9%。此外,试件的最终破坏形态为 U 肋底部屈曲。

关键词: 正交异性钢桥面板; 薄层 UHPC; 轻型组合桥面结构; 短栓钉; 疲劳试验; 剩余强度

中图分类号: U 441.4; U 443.31

文献标志码: A

Studies on Fatigue Performance of the Steel-thin UHPC Lightweight Composite Bridge Deck Structure

Zhao Yuhang¹, Cao Junhui^{1,2*}

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Key Laboratory for Wind and Bridge Engineering of Hunan Province, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Taking the U-ribbed steel-UHPC (ultra-high performance concrete) lightweight composite bridge deck as the researched object, a three point bending fatigue test of composite bridge deck was carried out under sparse stud layout. The shear resistance of stud, bending tension of thin layer and fatigue performance were studied and the residual strength was tested. The test result shows that after the accumulated fatigue loading of 32 million times, the maximum crack width in UHPC was only 0.05 mm and no obvious slips were observed at the steel-UHPC interface. The residual strength test indicates that the nominal cracking strength of UHPC was 15.7 MPa, which is 38.9% lower than that of similar test pieces without fatigue experience. In addition, the final failure pattern of the specimen was bottom flexion of the U rib.

Key words: orthotropic steel deck; thin UHPC; lightweight composite deck; short headed stud; fatigue test; residual strength

正交异性钢桥面板因具有自重轻、承载力高、施工简便等优点,被广泛应用于大跨度桥梁中,但其服役若干年后,却普遍存在两大类病害难题^[1]:一是

钢桥面易疲劳开裂;二是钢桥面铺装层频繁破损。针对上述典型病害问题,湖南大学邵旭东教授率先提出了钢-薄层 UHPC 轻型组合桥面结构,即通过在传

收稿日期: 2021-09-28

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51708200); 国家自然科学基金面上项目(51978259)

作者简介: 赵宇航,男,在读硕士研究生,主要从事钢-UHPC 新型组合结构桥梁等方面的研究工作。

通讯作者: 曹君辉,男,副教授,博士,主要从事钢-UHPC 新型组合结构桥梁等方面的研究工作。

引文格式: 赵宇航,曹君辉. 钢-薄层 UHPC 轻型组合桥面结构疲劳性能研究[J]. 市政技术,2022,40(3): 58-62. (ZHAO Y H, CAO J H. Studies on fatigue performance of the steel-thin UHPC lightweight composite bridge deck structure[J]. Municipal engineering technology, 2022, 40(3): 58-62. (in Chinese))

统正交异性钢桥面板上铺设薄层 UHPC, 来提高钢桥面的局部抗弯刚度, 以期根治上述病害。湖南大学团队在前期已开展了系列理论和试验研究, 取得了丰富的成果。

在钢-薄层 UHPC 轻型组合桥面结构抗弯、疲劳性能等方面, 目前相关研究也有了丰富的积累^[2-8], 但钢-薄层 UHPC 界面所采用的栓钉连接件间距一般为 150~200 mm, 考虑到轻型组合桥面结构抗裂和疲劳性能安全储备均较高^[3,9-11], 栓钉布置间距还

存在优化空间。因此, 笔者重点探索了 300 mm 栓钉间距下轻型组合桥面结构的疲劳性能, 并对经历了疲劳循环的试件继续开展剩余强度试验。

1 试件设计及制作

采用负弯矩三点加载进行 U 型肋的钢-薄层 UHPC 轻型组合结构试验, 试件宽 0.6 m、长 2 m。试件尺寸如图 1 所示。

试件采用 Q345qd 钢面板, 钢面板上焊接直径

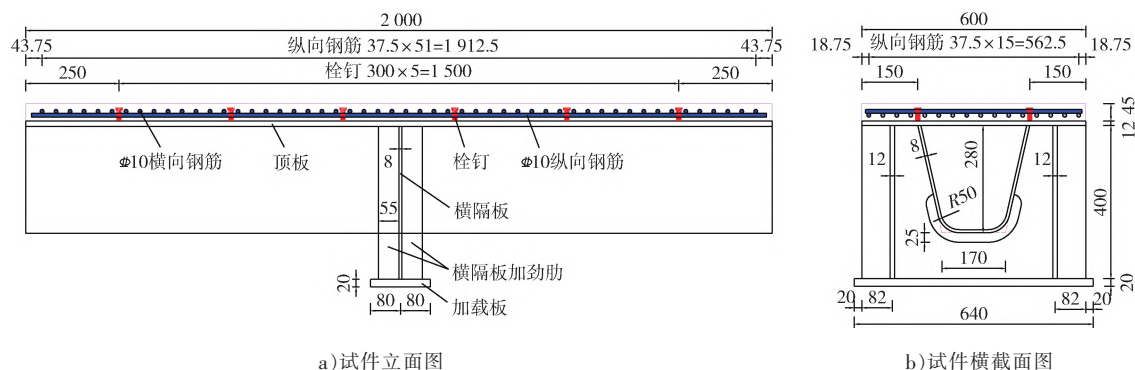


图1 试件尺寸图

Fig. 1 Dimension drawings of the specimen

13 mm 的栓钉, 焊后高度 32 mm, 栓钉纵、横向间距均为 300 mm。UHPC 层厚 45 mm, 其内配置 HRB400 带肋钢筋, 钢筋直径为 10 mm, 净保护层厚度为 15 mm。

所采用的 UHPC 主要由水泥、硅灰、粉煤灰、石英粉、石英砂、高效减水剂、平直型钢纤维和水等构成, 配合比如表 1 所示。其中, 钢纤维由 $\varnothing 0.12 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ (1.5%) 和 $\varnothing 0.2 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$ (2.0%) 2 种组成, 总掺量为 3.5%。

表1 UHPC 配合比(质量比)

Tab. 1 Matrix composition of UHPC (mass ratios)

水泥	硅灰	粉煤灰	石英砂	石英粉	高效减水剂	水胶比
1.0	0.2	0.1	1.1	0.2	0.026	0.180

为了测试 UHPC 材料的力学性能, 在制作钢-薄层 UHPC 轻型组合桥面结构试件的同时, 浇筑了一批 UHPC 材性试件, 包括: 100 mm×100 mm×100 mm 抗压试件、100 mm×100 mm×300 mm 弹性模量试件和 100 mm×100 mm×400 mm 抗折试件, 各 6 个。根据 GB/T 31387—2015《活性粉末混凝土》^[12]的方法开展材性试验, 然后对试验结果取平均值, 得到 UHPC 材料的抗压强度 $f_c=178.1 \text{ MPa}$ 、弹性模量 $E_c=50.8 \text{ GPa}$

和抗折强度 $f_t=36.0 \text{ MPa}$ 。

试件的制作过程主要包括: 钢梁加工、绑扎钢筋网、支模板、浇筑 UHPC 和蒸汽养护等。UHPC 浇筑完成后立即覆盖薄膜并洒水保湿, 待常温养护 3 d 后, 进行蒸汽养护 48 h, 蒸汽养护温度控制在 90~100 ℃。

试验中分别在试件的钢梁、钢筋和 UHPC 上布设应变片。主要应变片的分布如图 2 所示。

对于薄层 UHPC, 应变片主要布设在顶面和侧面, 而对于钢梁则主要布设在底面和侧面。在疲劳试验中需持续观测应变的变化。因为观测结果既能反映钢梁和 UHPC 应变的变化, 也能测试应变沿梁高的分布规律。

同时, 对试件在疲劳试验中的跨中挠度也应进行测试。

2 轻型组合结构疲劳试验

2.1 疲劳试验装置及加载

采用 PMS-500 型数显式脉动疲劳试验机进行静力和疲劳加载试验。其中疲劳荷载的频率控制为 4 Hz; 应变由东华 DH3816N 静态应力应变测试分析

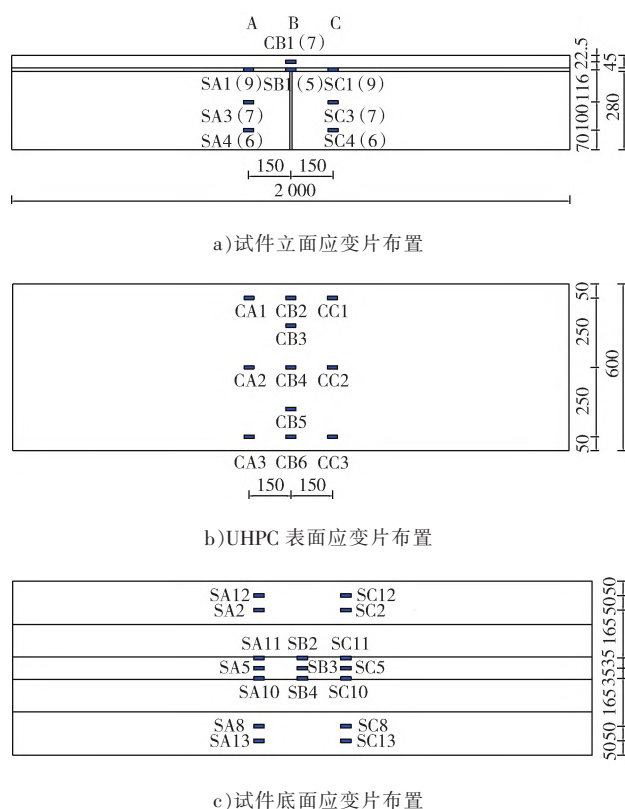


图 2 试件应变片布置示意图

Fig. 2 Layout of strain gauges of the specimen

系统采集,静位移由千分表测得。

2.2 栓钉的剪应力幅和 UHPC 的拉应力幅

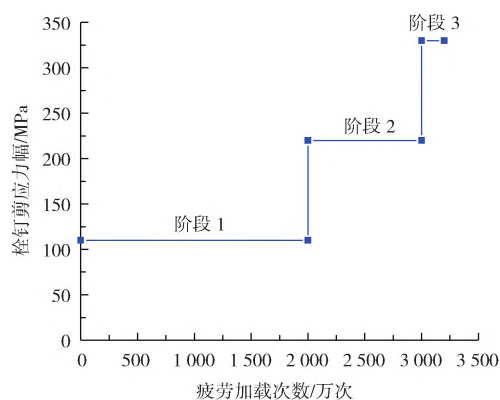
根据初等梁理论,栓钉的名义剪应力幅计算式为:

$$\Delta \tau_{sd} = \frac{p}{n \cdot A_{sd}} \frac{\Delta V \cdot Q}{I_0} \quad (1)$$

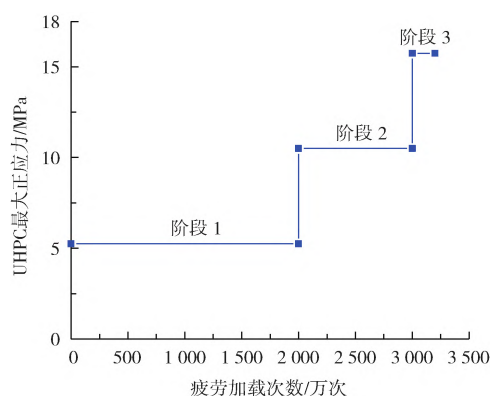
式中: p 为栓钉纵向间距, mm; n 为栓钉列数; A_{sd} 为栓钉的截面面积, mm²; ΔV 为试件的剪力幅, N; I_0 为组合界面的换算截面惯性矩, 即按模量等效将 UHPC 层换算成钢板, 再求得组合截面的惯性矩, mm⁴; Q 为钢-薄层 UHPC 界面上截面的一次矩, mm³。

根据式(1)确定栓钉的剪应力幅后(以此为控制指标), 分 3 个阶段进行疲劳加载, 即短栓钉的名义剪应力幅分别控制为 110、220 和 330 MPa, 对应状态下 UHPC 层的最大拉应力分别为 5.25、10.5 和 15.75 MPa。为确保疲劳加载的准确性, 在疲劳试验前对试件进行静载试验, 以便使试件实际的应力状态符合预期。以第 1 阶段为例, 静载试验按照 0→20→40→60→80→103 kN 逐级加载, 然后按照 103→80→60→40→20→0 kN 逐级卸载。

各加载阶段的控制应力变化如图 3 所示。



a) 栓钉剪应力幅



b) UHPC 最大拉应力

图 3 各加载阶段的控制应力变化

Fig. 3 Controlling stress of each loading stage

第 1 阶段为 0~2 000 万次, 荷载幅为 86.5 kN; 第 2 阶段为 2 000 万~3 000 万次, 荷载幅为 173 kN; 第 3 阶段为 3 000 万~3 200 万次, 荷载幅为 259.5 kN。3 个阶段的疲劳加载中, 荷载下峰值均取荷载幅的 0.2 倍, 以避免荷载下峰值过小而导致作动器脱空, 则根据荷载幅可进一步得到各个阶段的荷载上峰值, 分别为 103.8、207.6 和 311.4 kN。

2.3 疲劳试验结果及分析

2.3.1 跨中荷载-挠度曲线

每隔 100 万次疲劳加载后, 停机做静载试验, 得到了试件的跨中荷载-挠度曲线, 如图 4 所示。其中挠度测点位于跨中截面横隔板底面位置。

试验结果表明: 1) 在第 1 阶段(0~2 000 万次), 前 1 000 万次试件的最大挠度由 0.34 mm 增加到 0.39 mm, 增幅为 14.7%, 表明试件的刚度衰减较小, 但到 2 000 万次, 试件跨中挠度增加到 0.50 mm, 比 1 000 万次时增大 28.2%, 刚度衰减变快; 2) 在第 2 阶

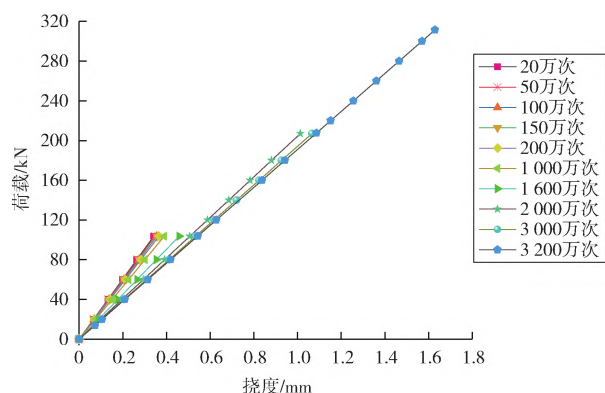


图4 跨中荷载-挠度曲线

Fig. 4 Load-deflection curves at the mid-span section

段(2 000万~3 000万次),跨中挠度增大到0.53 mm,相比2 000万次时增大6.0%,试件的刚度衰减仍然较缓;3)在第3阶段(3 000万~3 200万次),跨中挠度增大到0.54 mm,刚度衰减进一步延缓。

总体而言,试件的刚度衰减较小,表明在上述3个阶段的疲劳加载中,试件的损伤过程较为缓慢。

2.3.2 荷载-跨中UHPC应变特征

在2 000万次疲劳加载之前,UHPC表面的荷载-应变关系基本保持线性,UHPC表面未出现肉眼可视裂缝;2 000万次到3 000万次疲劳加载时,裂缝数量不断增加且宽度也同步变宽,试件的行为也表现出非线性的特征,UHPC表面应变不断增大;3 000万次疲劳加载结束后,UHPC最大裂缝宽度达到0.04 mm,裂缝数量达到15条;3 200万次疲劳加载结束后,UHPC裂缝数量达到20条,最大裂缝宽度达到0.05 mm。荷载-跨中UHPC表面应变曲线如图5所示。

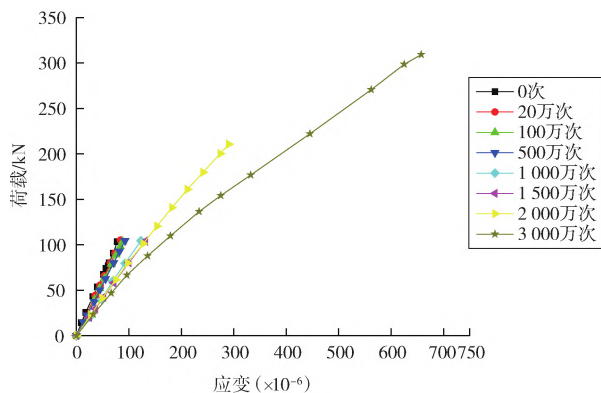


图5 荷载-跨中UHPC表面应变曲线

Fig. 5 Load-strain curves at the mid-span of UHPC surface

2.4 剩余强度试验及结果

由于试件累计疲劳加载3 200万次仍未出现疲劳破坏,因而对试验梁进行了剩余强度试验。试验过程分为2个阶段,第1阶段按荷载控制加载,每级荷载增量约为10 kN,当荷载达到峰值后进入第2阶段,此时按位移控制加载,以确保试件跨中挠度稳步增长,并直至试件破坏。

当试件荷载加载至162 kN时,出现第1条肉眼可见的新裂缝(不包括原疲劳裂缝);当荷载达到311 kN时,裂缝宽度达到0.05 mm。此时,UHPC表面的名义开裂应力为15.7 MPa。现选取其中1个纵向受弯试件与文献[9]的试验进行对比。该试件长为2 100 mm,宽为620 mm,UHPC层厚度为45 mm,纵向钢筋数量为16根,保护层厚度为15 mm,栓钉直径为13 mm,焊后高度为35 mm,栓钉间距为155 mm(除栓钉间距外,试件的其他参数基本相近)。根据其横向受弯性能试验的结果,当栓钉间距由200 mm变为150 mm时,构件的开裂应力仅提高了3%~11%,表明减少栓钉并不会显著提高UHPC的抗裂强度。文献[9]的静力试验结果表明,纵向受弯试件中UHPC的名义抗裂强度为25.7 MPa,而笔者试验中的UHPC剩余抗裂强度为15.7 MPa,降低了约38.9%。分析其原因,一方面,笔者的试验是在经历了3 200万次疲劳加载之后的剩余强度试验,而文献[9]中的试件未进行疲劳加载,因而笔者试件的抗裂强度理应会降低;另一方面,笔者试验方案中的栓钉间距为300 mm,相比文献[9]中的试验方案显著增大。因此,对比表明,若在钢-UHPC轻型组合桥面结构中增大栓钉间距,应根据实桥受力情况充分考虑薄层UHPC的抗裂强度储备。

当荷载加至944 kN时,U肋底部钢板发生屈曲现象,荷载达到峰值,此时裂缝宽度为0.45 mm。之后进入第2阶段,按位移控制方式加载,当荷载降至825 kN时,UHPC表面裂缝宽度为2 mm,此时U肋发生局部外鼓屈曲现象,表明试件已明显破坏,故未继续加载,试验终止。

3 结论

通过开展钢-薄层UHPC轻型组合桥面结构抗弯疲劳试验和剩余强度试验,得到以下结论:

1)钢-薄层UHPC轻型组合桥面结构抗弯疲劳试验表明,在栓钉名义剪应力幅达到110 MPa时,经

过 2 000 万次疲劳加载后,试件未发生 UHPC 层开裂、界面滑移等现象;在栓钉名义剪应力幅达到 220 MPa、钢-薄层 UHPC 轻型组合梁历经 1 000 万次疲劳加载后,UHPC 层出现了细微的疲劳裂纹,但最大裂缝宽度不超过 0.04 mm;在栓钉名义剪应力幅达到 330 MPa、继续加载 200 万次时,UHPC 的裂缝略有扩展,达到 0.05 mm,但此时结构仍未出现疲劳破坏。因此,试件累计经历了 3 200 万次疲劳加载,未出现显著的疲劳损伤,表明该结构具有良好的抗疲劳性能。

2)钢-薄层 UHPC 组合桥面结构剩余强度试验表明,UHPC 表面名义开裂应力为 15.7 MPa,与相关文献中类似试件的纯静力试验结果相比,UHPC 的剩余抗裂强度降低了 38.9%,表明栓钉布置密度降低后,对薄层 UHPC 的抗裂性能有一定影响。但试件的破坏模式为 U 肋底部受压屈曲,表明栓钉布置密度降低对构件的破坏模式并无影响,且破坏时 UHPC 的最大裂缝宽度约为 2 mm。MET

[参考文献]

- [1] SHAO X D, YI D T, HUANG Z Y, et al. Basic performance of the composite deck system composed of orthotropic steel deck and ultrathin RPC layer[J]. Journal of bridge engineering, 2013, 18(5): 417-428.
- [2] 刘梦麟, 邵旭东, 张哲, 等. 正交异性钢板-超薄 RPC 组合桥面板结构的抗弯疲劳性能试验[J]. 公路交通科技, 2012, 29(10): 46-53. (LIU M L, SHAO X D, ZHANG Z, et al. Experiment on flexural fatigue performance of composite deck system composed of orthotropic steel deck and ultra-thin RPC layer[J]. Journal of highway and transportation research and development, 2012, 29(10): 46-53. (in Chinese))
- [3] 丁楠, 邵旭东. 轻型组合桥面板的疲劳性能研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(1): 74-81. (DING N, SHAO X D. Study on fatigue performance of light-weighted composite bridge deck[J]. China civil engineering journal, 2015, 48(1): 74-81. (in Chinese))
- [4] 朱忠. 板肋超高性能混凝土轻型组合桥面研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017. (ZHU Z. Study on ultra-high performance concrete layer of lightweight composite bridge deck with plate ribs [D]. Changsha: Hunan University, 2017. (in Chinese))
- [5] CHEN S, HUANG Y, GU P, et al. Experimental study on fatigue performance of UHPC-orthotropic steel composite deck[J]. Thin-walled structures, 2019, 142: 1-18.
- [6] FENG Z, LI C, HE J, et al. Static and fatigue test on lightweight UHPC-OSD composite bridge deck system subjected to hogging moment[J]. Engineering structures, 2021, 241: 112459.
- [7] 刘诚, 樊健生, 聂建国, 等. 钢-超高性能混凝土组合桥面系中栓钉连接件的疲劳性能研究[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3): 139-146. (LIU C, FAN J S, NIE J G, et al. Fatigue performance research of headed studs in steel and ultra-high performance concrete composite deck[J]. China journal of highway and transport, 2017, 30(3): 139-146. (in Chinese))
- [8] 汪颖. 钢-STC 轻型组合桥面结构中栓钉焊趾处钢板性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017. (WANG E Y. Study on performance of steel plate near the weld toe in the STC-steel lightweight composite deck[D]. Changsha: Hunan University, 2017. (in Chinese))
- [9] 邵旭东, 罗军, 曹君辉, 等. 钢-UHPC 轻型组合桥面结构试验及裂缝宽度计算研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(3): 61-75. (SHAO X D, LUO J, CAO J H, et al. Experimental study and crack width calculation of steel-UHPC lightweight composite deck structure[J]. China civil engineering journal, 2019, 52(3): 61-75. (in Chinese))
- [10] 张哲. 钢-配筋 UHPC 组合桥面结构弯曲受拉性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016. (ZHANG Z. Bending behaviors of composite bridge deck system composed of OSD and reinforced UHPC layer[D]. Changsha: Hunan University, 2016. (in Chinese))
- [11] 曹君辉. 钢-薄层超高性能混凝土轻型组合桥面结构基本性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016. (CAO J H. Research on basic performance of steel-thin uhpc lightweight composite deck [D]. Changsha: Hunan University, 2016. (in Chinese))
- [12] 清华大学, 等. GB/T 31387—2015 活性粉末混凝土[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015. (Tsinghua University, et al. Reactive powder concrete: GB/T 31387—2015[S]. Beijing: China Quality and Standards Publishing Co., Ltd., 2015. (in Chinese))

金华金义东市域轨道交通义东线首通段通车试运行

2022 年 3 月 1 日,金义东市域轨道交通义东线首通段通车试运行仪式在体育馆站举行。东阳市副市长李敢峰,集团公司领导蒋明、谭志文、韦妙鸳,市公安局轨道交通治安管理局政委郭翎和东阳市、义乌市有关部门负责人参加仪式。仪式由市轨道交通集团党委委员、副总经理蒋远主持。此次通车试运行区段为义东线凌云站至体育馆站,涉及 11 座车站、10 个区间,正线长约 27.6 km。电客车分别以低、中、高速分速度等级沿既定的走行路径往返运行验证,通过电客车滑动取流对接触轨及供电系统设备的系统性能完成一次“综合体检”。该次试运行成功,标志着该区段已具备轨行区动车试运行的条件,为下一阶段联调联试和 7 月份通车试运营打下了坚实的基础。

(转载自中国轨道交通网)