

DOI: 10.7672/sgjs2026080144

某PC连续箱梁桥火灾后承载性能评定*

毛德均¹,杜艳斌²,陈旭¹,兰树伟¹,王春华¹,王盘盘¹,许鹏³

(1.昆明学院建筑工程学院,云南昆明650214;2.云南交投集团云岭建设有限公司,云南昆明650032;3.云南通衢工程检测有限公司,云南昆明650041)

[摘要] 为准确评估某高速公路PC连续箱梁桥遭受火灾事故后的承载性能,在常规检测基础上对其开展现场荷载试验,并提出修复处治措施建议。试验前,采用有限元方法分析该桥在设计使用状态下的受力变形行为。试验过程中,测试受火灾影响的桥跨结构控制截面的应变和挠度及桥梁自振频率、阻尼比和冲击系数。试验结果表明,此次火灾事故后,箱梁应变和挠曲变形工作状态仍能满足设计要求;桥梁整体刚度未出现明显退化,上部结构及支撑系统无明显异常缺损;正常行驶车辆产生的冲击效应仍能满足设计要求。综上所述,该桥承载力和动力工作性能仍能满足设计使用要求。为确保修复后恢复交通期间的运行安全及行车舒适性,建议采取限速措施,将车速控制在60km/h以内。本次荷载试验有效评估了桥梁火灾后的承载性能,为修复处治措施提供了科学依据。

[关键词] 桥梁;箱梁桥;火灾;试验;承载力

[中图分类号] U446.1;U447

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)08-0144-06

Evaluation of Bearing Performance for a PC Continuous Box Girder Bridge After Fire

MAO Dejun¹, DU Yanbin², CHEN Xu¹, LAN Shuwei¹, WANG Chunhua¹,
WANG Panpan¹, XU Peng³

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Kunming University, Kunming, Yunnan 650214, China;

2. Yunling Construction Co., Ltd. of Yunnan Communications Investment & Construction Group, Kunming,

Yunnan 650032, China; 3. Yunnan Tongqu Engineering Testing Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650041, China)

Abstract: In order to accurately evaluate the bearing performance of a PC continuous box girder bridge on a certain expressway after a fire accident, on the basis of routine testing, on-site load tests were conducted and suggestions for repair and treatment measures were proposed. Before the test, the finite element method was used to analyze the stress and deformation behavior of the bridge in its design and usage state. During test, the strain and deflection of the control section of the bridge span structure affected by fire were tested, as well as the natural frequency, damping ratio, and impact coefficient of the bridge. The test results showed that after this fire accident, the working conditions of the strain and deflection deformation of the box girder could still meet the design requirements. The overall stiffness of the bridge did not show significant degradation, and there were no obvious abnormal defects or deterioration in the upper structure and support system. The impact effect generated by normal driving vehicles still met the design requirements. The bearing capacity and dynamic performance of the bridge could still meet the design and usage requirements. In order to ensure the operation safety and driving comfort during the recovery of traffic after repair, it is recommended to take speed limit measures to control the vehicle speed within 60km/h. Load tests can be used to conduct a more effective assessment of the bearing performance of bridges after a fire, so as to improve the scientific nature of repair and treatment measures.

*2023年云南省科技特派员项目(ZX20230180);云南省科技厅基础研究专项-面上项目(202401CF070006);昆明学院引进人才科研项目(XJ20220031)

[作者简介] 毛德均,博士,副教授,硕士生导师,E-mail:541089451@qq.com

[收稿日期] 2025-07-10

存在混凝土剥落,混凝土强度满足设计要求。显然,仅靠上述常规检测结果难以准确评估该桥火灾后的承载性能。为更加准确有效地掌握该桥火灾后的承载性能,为修复处治措施制定提供科学依据,对其开展现场荷载试验。



图 3 箱梁混凝土剥落

Fig. 3 Concrete spalling for box girder

2 试验方法

2.1 有限元分析

根据设计文件,采用 MIDAS Civil 软件建立上部结构有限元模型(见图 4),开展计算分析。在模型中,主梁采用梁单元,桥梁两端的 4 个梁单元长度取值为 0.5m,其余梁单元长度取值为 1m,墩顶支座处单独建立结点,在支座结点处采用一般支撑模拟支座,支座结点与同一竖平面的箱梁结点间采用刚性连接,桥面铺装和栏杆作为二期恒荷载,以梁单元荷载形式施加至主梁,该桥上部结构共离散为 71 个结点、62 个单元。本次试验有限元分析的作用为:核算并确定试验荷载控制值、加载位置和测试断面,为试验方案制订提供科学依据;根据 JTG/T J21-01—2015《公路桥梁荷载试验规程》^[16]提供的试验结果分析方法,将应变、挠度、自振频率和冲击系数等实测结果与有限元计算结果进行对比分析,以对该桥火灾后的承载性能开展综合评定。

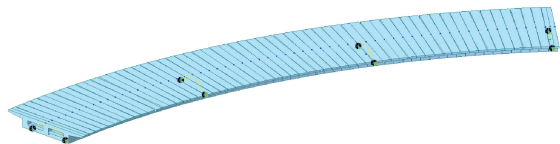


图 4 有限元模型

Fig. 4 Finite element model

2.2 静载试验

静载试验用于评估承载力。根据桥梁火灾后的常规检测结果,取第 1,2 跨为试验对象,采用设计荷载作为试验控制荷载。根据该桥结构特点和代表性原则制定了 6 种加载工况(见表 1),各工况荷载效率为 0.89~1.03,满足要求^[16-17],表 1 中的试验控制截面 JM1, JM2, JM3 位置如图 5 所示。采用单车

总重为 42t 的 3 轴重载汽车加载,每个工况均使用 4 辆车。为确保安全,正式加载前先预载,正式加载分 2 级进行,工况 1 满载时的加载车辆布置如图 6 所示。

表 1 静载试验加载工况

Table 1 Loading conditions for static load test

工况	研究内容	加载方式	荷载效率
1	第 1 跨截面 1(JM1)	内偏载	0.97
2	最大正弯矩	外偏载	0.94
3	1 号墩墩顶截面 2(JM2)	内偏载	0.96
4	最大负弯矩	外偏载	0.89
5	第 2 跨截面 3(JM3)	内偏载	1.03
6	最大正弯矩	外偏载	0.94

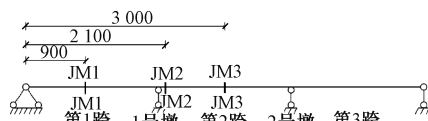


图 5 试验控制截面(单位:cm)

Fig. 5 Experimental control section(unit:cm)

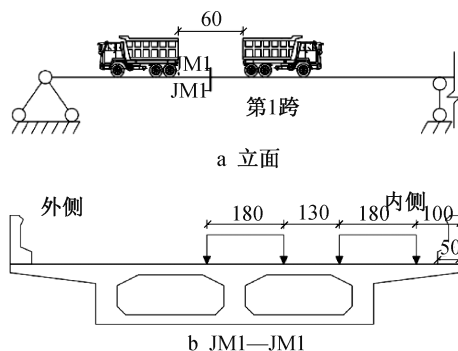


图 6 工况 1 加载车辆布置(单位:cm)

Fig. 6 Loading vehicle layout for condition 1(unit:cm)

静载试验测试内容为箱梁控制断面应变和挠度,其中应变采用 RS-QL06 桥梁应变测试系统测量,挠度采用最小划分值及精度为 0.3mm 的电子水准仪测量。在图 5 所示 JM1, JM2, JM3 截面布置应变测点,各截面布置数量相同;在第 1~3 跨的支点、 $L/4$, $L/2$ 和 $3L/4$ (L 为跨径)处桥面两侧布置挠度测点。应变和挠度测点横向布置如图 7 所示,全桥共 15 个应变测点、26 个挠度测点。

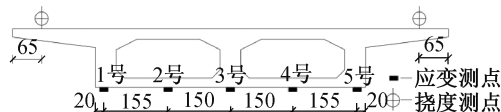


图 7 测点横向布置(单位:cm)

Fig. 7 Transversal arrangement of measuring points(unit:cm)

2.3 动载试验

动载试验用于评估桥梁动力工作性能,包括模态试验和跑车试验。其中,模态试验是在第 1~3 跨

的 $L/4, L/2, 3L/4$ 处的桥面中心线布置测振传感器, 测量外界各因素引起的桥梁微小且不规则振动, 通过频谱分析得到桥梁自振特性参数, 主要为自振频率和阻尼比。跑车试验是采用 1 辆静载试验加载车分别以 20, 30, 40km/h 速度沿桥面中心线匀速行驶, 采用 DH5908 动应变测试分析系统测定箱梁底部在运行车辆荷载作用下的动应变, 根据最大动应变幅值得到冲击系数。

3 试验结果及分析

3.1 静载试验

3.1.1 应变

试验控制截面 JM1, JM2, JM3 在试验荷载作用下的应变分布如图 8~10 所示, 图中应变拉正压负, 卸载后的相对残余应变如表 2 所示。

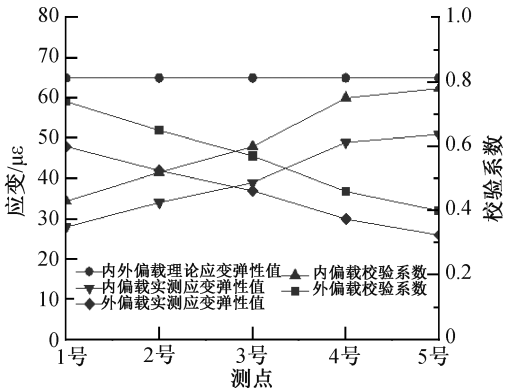


图 8 JM1 内外偏载应变分布

Fig. 8 Strain distribution of internal and external bias load in JM1

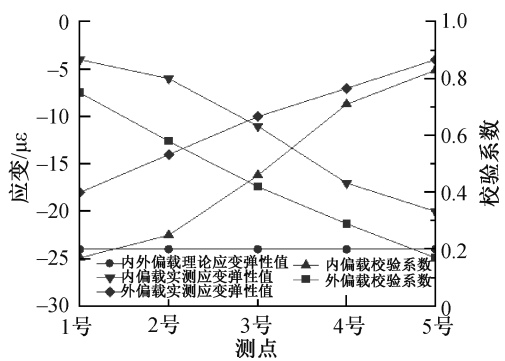


图 9 JM2 内外偏载应变分布

Fig. 9 Strain distribution of internal and external bias load in JM2

由图 8~10 可知, 在试验荷载作用下, JM1, JM2, JM3 各测点应变实测值均小于理论值, 说明该桥箱梁应变状态正常; 应变校验系数为 0.17~0.87, 此类桥梁荷载试验应变校验系数常值为 0.60~0.90^[16], 应变校验系数试验值与常值范围相比偏小, 说明该桥箱梁材质强度满足设计使用要求且有

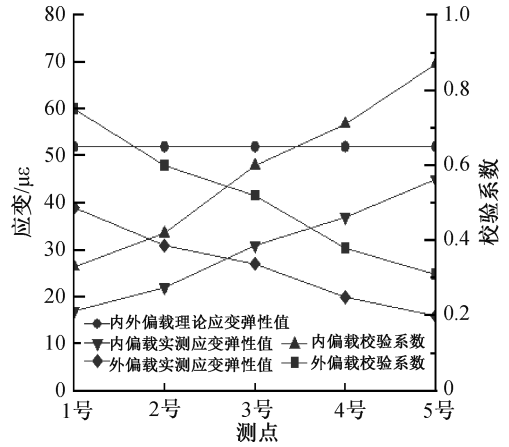


图 10 JM3 内外偏载应变分布

Fig. 10 Strain distribution of internal and external bias load in JM3

表 2 相对残余应变

Table 2		Relative residual strain					%
截面	加载方式	测点					
		1号	2号	3号	4号	5号	
JM1	内偏载	3.70	9.68	5.41	2.00	1.92	
	外偏载	0.00	2.44	5.71	3.23	3.70	
JM2	内偏载	1.25	4.23	8.33	6.25	0.00	
	外偏载	12.50	7.69	9.09	0.00	0.00	
JM3	内偏载	5.56	0.00	3.13	2.63	0.00	
	外偏载	0.00	6.06	3.85	4.76	0.00	

一定富余。由表 2 可知, 卸载后, JM1, JM2, JM3 各测点相对残余应变普遍较小, 为 0~12.5%, 小于限值 20%^[16], 说明试验过程中箱梁应变处于良好的弹性工作状态, 满足设计使用要求。上述结果综合表明, 虽遭受此次火灾侵蚀, 但该桥箱梁材质强度和应变工作状态仍能满足设计使用要求。

3.1.2 挠度

静载试验挠度结果如表 3 所示。由表 3 可知, 该桥在试验荷载作用下的挠度校验系数为 0.18~0.89, 小于限值 1.0^[16], 说明各测点挠度实测值均小于理论值, 桥梁挠曲变形状态满足设计使用要求; 各测点相对残余挠度为 0.57%~14.81%, 小于限值 20%^[16] 且总体偏小, 说明该桥在车辆荷载作用下的挠曲变形恢复能力较好, 接近弹性工作状态, 满足设计使用要求。上述结果综合表明, 虽遭受此次火灾侵蚀, 但该桥箱梁刚度 and 挠曲变形恢复能力

表 3 挠度试验结果

Table 3			Results of deflection test		
工况	挠度校验系数	相对残余挠度/%	工况	挠度校验系数	相对残余挠度/%
2	0.18~0.58	0.57~6.78	5	0.20~0.84	0.96~6.20
3	0.25~0.89	1.38~10.34	6	0.19~0.60	0.82~7.90

仍能满足设计使用要求。

3.2 动载试验

3.2.1 自振特性

模态试验得到的自振频率和阻尼比如表 4 所示。由表 4 可知,该桥前 3 阶竖向弯曲自振频率实测值均大于理论值,实测值与理论值比值分别为 1.384,1.271,1.087,说明该桥整体刚度未因此次火灾事故而明显退化,满足设计使用要求;阻尼比实测值分别为 0.012,0.020,0.027,处于正常水平,说明该桥上部结构和支撑系统未因此次火灾事故而出现明显异常缺损或劣化,整体技术状况正常。

表 4 自振频率和阻尼比

Table 4 Natural frequency and damping ratio

振型特征	自振频率			阻尼比 实测值
	理论值/ Hz	实测值/ Hz	实测值/ 理论值	
竖向一阶	6.140	8.496	1.384	0.012
竖向二阶	7.799	9.912	1.271	0.020
竖向三阶	10.786	11.719	1.087	0.027

3.2.2 冲击系数

跑车试验得到的冲击系数结果如图 11 所示。由图 11 可知,该桥冲击系数与试验车速呈较明显的正相关线性关系,试验车速为 20,30,40km/h 时的冲击系数分别约为 1.22,1.24,1.26,均小于规范设计值 1.31,说明虽遭受此次火灾侵蚀,但正常行驶车辆对该桥产生的冲击效应仍能满足设计要求。鉴于该桥汽车荷载冲击系数与车速呈较明显的正相关线性关系,为确保运行安全和行车舒适性,恢复交通时宜采取限速 60km/h 的措施。

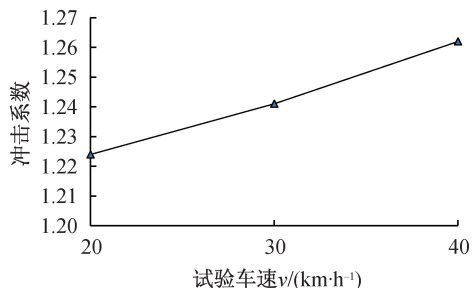


图 11 冲击系数试验结果

Fig. 11 Results of impact coefficient test

4 修复处治措施建议

荷载试验结果表明,该桥箱梁主体结构未在此次火灾事故中严重受损。综合常规检测和荷载试验结果,对该桥火灾后的修复处治提出如下建议。

1) 桥面铺装。第 1,2 跨桥面整体铣刨、全面清理后重新铺设防水层和沥青混凝土铺装层。

2) 护栏。凿除松散混凝土至坚实面层,清理外

露钢筋,对有损伤钢筋进行更换后采用比原混凝土强度高一强度等级的混凝土修复。

3) 主梁。凿除受火部位表层混凝土后用环氧砂浆修复。

4) 支座。清除表面熏黑脏污。

5) 墩柱。表观熏黑部位修复方式同主梁,混凝土剥落部位修复方式同护栏。

6) 主梁和墩柱受火部位修复后涂刷耐久性防护材料。

7) 恢复交通时,宜采取限速措施,将车速控制在 60km/h 以内。

管养单位按上述建议对该桥进行修复处治,恢复交通后该桥运营状态正常。

5 结语

1) 静载试验结果表明,虽遭受此次火灾侵蚀,但该桥箱梁材质强度和应变工作状态、静力刚度和挠曲变形恢复能力仍能满足设计使用要求。

2) 动载试验结果表明,虽遭受此次火灾侵蚀,但该桥整体刚度未出现明显退化,上部结构和支撑系统未出现明显异常缺损或劣化,正常行驶车辆产生的冲击效应仍能满足设计要求。

3) 静、动载试验结果综合表明,该桥承载力和动力工作性能仍能满足设计使用要求;该桥汽车荷载冲击系数与车速呈较明显的正相关线性关系,为确保运行安全和行车舒适性,修复后恢复交通时宜采取限速措施,将车速控制在 60km/h 以内。

4) 在常规检测基础上,可采用荷载试验对桥梁在火灾后的承载性能开展更加有效的评估,以提高修复处治措施的科学性。

参考文献:

- [1] 张岗,贺拴海,侯伟,等. 预应力混凝土桥梁抗火研究综述[J]. 长安大学学报(自然科学版),2018,38(6):1-10.
ZHANG G, HE S H, HOU W, et al. Review on fire resistance of prestressed-concrete bridge [J]. Journal of Chang'an University (natural science edition), 2018, 38(6): 1-10.
- [2] 张岗,贺拴海,宋超杰,等. 钢结构桥梁抗火研究综述[J]. 中国公路学报,2021,34(1):1-11.
ZHANG G, HE S H, SONG C J, et al. Review on fire resistance of steel structural bridge girders [J]. China journal of highway and transport, 2021, 34(1): 1-11.
- [3] 王保群,邢德进,陶莉莉,等. 火灾配筋混凝土空心板梁承载力试验研究[J]. 公路,2020,65(7):104-108.
WANG B Q, XING D J, TAO L L, et al. Experimental research on bearing capacity of reinforced concrete hollow slab beams after fire [J]. Highway, 2020, 65(7): 104-108.
- [4] 康俊涛,王伟. 火灾下大跨度钢桁架拱桥结构性能分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2020,52(9):77-84.
KANG J T, WANG W. Analysis of structural performance of long-

- span steel trussed arch bridge exposed to fire [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(9): 77-84.
- [5] PERIS-SAYOL G, PAYA-ZAFORTEZA I, ALOS-MOYA J, et al. Analysis of the influence of geometric, modeling and environmental parameters on the fire response of steel bridges subjected to realistic fire scenarios [J]. Computers & structures, 2015, 158: 333-345.
- [6] PAYÁ-ZAFORTEZA I, GARLOCK M E M. A numerical investigation on the fire response of a steel girder bridge [J]. Journal of constructional steel research, 2012, 75: 93-103.
- [7] 李雪红, 杨星堃, 徐秀丽, 等. 大跨桥梁油罐车燃烧火灾模型计算方法研究 [J]. 中国公路学报, 2022, 35(6): 147-157.
LI X H, YANG X C, XU X L, et al. Research on calculation method for tank truck fire model on large-span bridge [J]. China journal of highway and transport, 2022, 35(6): 147-157.
- [8] 张晓栋, 马如进, 陈艾荣. 车致火灾作用下预应力混凝土 T 梁易损性计算方法 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2018, 38(6): 11-19.
ZHANG X D, MA R J, CHEN A R. Vulnerability calculation method of prestressed concrete T-shaped girder exposed to vehicles-related fires [J]. Journal of Chang'an University (natural science edition), 2018, 38(6): 11-19.
- [9] 刘旭政, 李任福, 余晨曦, 等. 火灾后混凝土桥梁结构安全初步评估方法 [J]. 广西大学学报(自然科学版), 2022, 47(1): 62-73.
LIU X Z, LI R F, YU C X, et al. Preliminary safety assessment method for concrete bridge structure after fire exposure [J]. Journal of Guangxi University (natural science edition), 2022, 47(1): 62-73.
- [10] 钟元, 王磊. 混凝土桥梁火灾后损伤检测与技术状况评估 [J]. 公路, 2023, 68(3): 228-232.
ZHONG Y, WANG L. Damage detection and technical evaluation of concrete bridge after fire [J]. Highway, 2023, 68(3): 228-232.
- [11] 田宇, 卢文良, 方继伟, 等. 某混凝土公路桥火灾后损伤评定 [J]. 中外公路, 2018, 38(3): 119-124.
TIAN Y, LU W L, FANG J W, et al. The damage assessment of a concrete highway bridge after fire [J]. Journal of China & foreign highway, 2018, 38(3): 119-124.
- [12] 唐鹏, 宫赛. 火灾发生后小型桥梁的快速检测评估与加固研究 [J]. 公路, 2019, 64(10): 93-98.
TANG P, GONG S. Research on rapid detection, evaluation and strengthening of small bridges after fire [J]. Highway, 2019, 64(10): 93-98.
- [13] 蔡正东, 叶敏. 某钢结构桥梁火灾后检测评估和安全鉴定 [J]. 桥梁建设, 2019, 49(S1): 62-67.
CAI Z D, YE M. Inspection, evaluation and safety identification for a steel bridge experienced a fire disaster [J]. Bridge construction, 2019, 49(S1): 62-67.
- [14] 毛德均, 吴维彬, 郭俊, 等. 长联多跨 PC 连续宽幅箱梁桥荷载试验研究 [J]. 中外公路, 2023, 43(6): 165-170.
MAO D J, WU W B, GUO J, et al. Study on load test of long link multi-span PC continuous wide box-girder bridge [J]. Journal of China & foreign highway, 2023, 43(6): 165-170.
- [15] 曾德礼. 大跨度桥梁承载能力鉴定研究 [J]. 桥梁建设, 2018, 48(5): 43-47.
ZENG D L. Study on identification of load bearing capacity of long span bridge [J]. Bridge construction, 2018, 48(5): 43-47.
- [16] 长安大学. 公路桥梁荷载试验规程: JTG/T J21-01—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2016.
Chang'an University. Regulation of load test for highway bridge: JTG/T J21-01—2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2016.
- [17] 邢兵, 强士中, 唐堂. 关于桥梁承载能力评定若干问题的思考 [J]. 中外公路, 2015, 35(6): 152-155.
XING B, QIANG S Z, TANG T. Reflections on some problems of bridge bearing capacity evaluation [J]. Journal of China & foreign highway, 2015, 35(6): 152-155.

(上接第 131 页)

- YANG D H, WANG Z T, WANG Q, et al. Experimental study on flexural behaviors of bolted steel-UHPC-NC composite girders in hogging moment zone [J]. Bridge construction, 2025, 55(2): 34-42.
- [16] 曾丹, 曹磊, 刘扬, 等. 钢-GFRP 板条-UHPC 组合桥面结构开裂及裂缝宽度计算方法研究 [J]. 桥梁建设, 2024, 54(5): 94-101.
ZENG D, CAO L, LIU Y, et al. Research on flexural test and crack width calculation methods for steel-GFRP strips-UHPC composite deck [J]. Bridge construction, 2024, 54(5): 94-101.
- [17] 谭星宇, 方志, 李修坤, 等. 大跨斜拉桥节段预制钢-UHPC 组合桥面结构受力性能研究 [J]. 桥梁建设, 2024, 54(5): 102-109.
TAN X Y, FANG Z, LI X K, et al. Mechanical properties of segmental steel-UHPC composite deck panels for long-span cable-stayed bridge [J]. Bridge construction, 2024, 54(5): 102-109.
- [18] 刘新华, 周聪, 张建仁, 等. 钢-UHPC 组合梁负弯矩区受力性能试验 [J]. 中国公路学报, 2020, 33(5): 110-121.
LIU X H, ZHOU C, ZHANG J R, et al. Experiment on negative bending behavior of steel-UHPC composite beams [J]. China journal of highway and transport, 2020, 33(5): 110-121.
- [19] 刘志峰, 卢涛, 包杰, 等. 无粘结预应力 UHPC 梁剪切性能试验研究 [J]. 世界桥梁, 2024, 52(5): 69-75.
LIU Z F, LU T, BAO J, et al. Experimental study on shear performance of unbonded prestressed UHPC girder [J]. World bridges, 2024, 52(5): 69-75.
- [20] 清华大学, 江西贝融循环材料股份有限公司, 南京倍立达新材料系统工程股份有限公司. 超高性能混凝土基本性能与试验方法: T/CBMF 37—2018 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
Tsinghua University, Jiangxi Beirong Recycling Materials Co., Ltd., Nanjing Beilida New Materials System Engineering Co., Ltd. Fundamental characteristics and test methods of ultra-high performance concrete: T/CBMF 37—2018 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.