

大跨度钢-混凝土组合梁桥静载试验 及初应力分析

王庆贺,杨永琛,刘瑞鑫,王超

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究桥梁在服役荷载下的混凝土及钢梁初始应力,评价大跨度钢-混凝土组合桥梁成桥阶段的混凝土开裂风险。方法 进行桥梁成桥阶段的静载试验,实测不同工况下桥梁典型截面的挠度和应力水平;采用 MIDAS/Civil 软件建立钢-混凝土组合梁桥有限元模型,并采用静载试验数据验证模型的可靠性。结果 桥梁各截面的应力和挠度均低于理论计算值,应力校验系数为 0.78~0.82、挠度校验系数为 0.55~0.91;桥梁产生一定的残余应变与残余变形,最大残余应变为 1.87%,残余变形为 18.0%;有限元结果与试验结果相差较小,实测值与理论值大多相差在 20%以内,在设计荷载作用下,钢-混凝土组合梁的中部支座附近的混凝土将发生开裂,开裂约为桥梁跨度的 16%~38%,槽型钢梁的应力水平约为屈服强度的 36%。结论 桥梁抗扭性能较好且实际应用状态优于设计状态,有限元模型可以较好地模拟静力荷载作用下的组合结构桥梁的应力与挠度,在正常服役荷载作用下,大跨度钢-混凝土组合桥梁中混凝土存在开裂风险,但开裂范围有限。

关键词 钢-混凝土组合结构;静力荷载试验;有限元分析;初应力

中图分类号 TU398

文献标志码 A

Field Test and Initial Stress of Large-Span Steel-Concrete Composite Bridges

WANG Qinghe, YANG Yongchen, LIU Ruixin, WANG Chao

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China 110168)

Abstract: The initial stress state on concrete component and steel component under design loads are obtained based on which the cracking possibility of concrete component is evaluated for large-span composite bridges. With this aim, static load tests were carried out to measure the deflection and stress levels of typical bridge sections under different working conditions. Midas/Civil software was used to establish the finite element model of steel-concrete composite bridge, and

收稿日期:2021-04-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51808351);天津市科技计划项目(18ZXGDGX00030);辽宁省科技厅博士科研启动项目(2019-BS-193);沈阳市中青年科技人才项目(RC200143)

作者简介:王庆贺(1987—),男,副教授,博士,主要从事钢-混凝土组合结构方面研究。

static load test data were used to verify the reliability of the FE model. The static load test results show that the stress and deflection of each section of the bridge are lower than the theoretical calculation values, and the stress check coefficient is 0.78 ~ 0.82, and the deflection check coefficient is 0.55 ~ 0.91. In addition, the residual strain and residual deformation of the bridge are limited, the maximum residual strain 1.87% and the residual deformation 18.0%. The difference between the finite element results and the experimental results is small, and the difference between the measured values and the theoretical values is mostly within 20%. Under the design load, the concrete near the central support of the steel-concrete composite beam will crack, the crack range about 16% ~ 38% bridge span, and the stress level of the channel steel beam about 36% yield strength. Static load tests show that this kind of bridge has good torsional resistance and the actual application state is better than the design state. The finite element model can simulate the stress and deflection of the composite structure bridge under static load. Under the service load, the concrete in the long-span steel-concrete composite bridge has the risk of cracking, but the cracking range is limited.

Key words: steel-concrete composite structure; static load test; finite element analysis; initial stress

钢-混凝土组合结构桥梁通过抗剪连接件将钢结构与混凝土结构结合成为整体,具有承载能力高、自重小等优势^[1-2]。早期组合结构桥梁的跨度一般为20~25 m,近年来跨度不断增加,甚至应用于千米级的斜拉桥^[3-6]。目前,对于跨越铁路或公路的钢-混凝土组合结构桥梁,一般采用顶推法进行施工^[7],即通过顶推设备,将后方预制成型的钢结构或组合结构桥梁顶推至目标位置。为了保障桥梁施工及运营阶段的安全,评价施工阶段的风险。G. B. Michael^[8]采用系统的现场测试评价程序,量化了实际荷载分布对桥梁承载能力的影响。J. O. Eugene等^[9]提出了一种损伤检测的方法,并采用有限元模型来验证其有效性与准确性。任东华等^[10]对试验荷载效率进行了可靠度分析,提出了一种确定试验荷载效率取值的方法。田志勇等^[11]通过对三跨钢-混凝土组合梁自锚式悬索桥的静、动载试验,测试分析了各工况下的主梁挠度、主桥与桥塔的截面应力,验证了该桥的受力状态及设计的合理性。刘荣桂等^[12]将中国首座CFRP拉索斜拉桥的实测与理论计算结果进行了对比分析,为后续相关的研究和实践提供参考。王庆贺等^[13]以某小半径曲线连续刚构特大桥为例,

建立0、1、2号块的精细化分析模型,详细分析0号块受力特征、提出相应的施工应对措施。贾毅等^[14]对某桥做现场荷载试验,评价其在试验荷载作用下的桥梁状况。目前研究大都针对桥梁的承载能力,但实际上桥梁在正常运营阶段可能出现裂缝。基于此,笔者基于某大跨度钢-混凝土组合结构桥梁,在其成桥阶段进行静载试验,实测不同荷载工况下桥梁典型截面的挠度和应变,对比静载试验数据与理论计算结果,评价了施工质量。采用MIDAS软件建立桥梁成桥阶段的有限元模型,采用静载试验数据验证有限元模型的可靠性,进而分析桥梁在服役荷载下的混凝土及钢梁初始应力,评价其开裂风险。

1 成桥阶段现场试验及结果分析

1.1 跨线组合结构桥梁的关键施工步骤

某跨越铁路线的组合结构梁桥,其上部结构采用 $2 \times 55 \text{ m} + (60 \text{ m} + 70 \text{ m} + 60 \text{ m}) + (60 \text{ m} + 65 \text{ m} + 60 \text{ m})$ 的连续钢箱-混凝土组合梁,桥面宽12.75 m。桥梁平面位于直线上,顺桥向位于纵坡为+2.166%。桥跨布置图和横断面布置如图1所示。桥梁下部结构1~7#墩采用双柱式桥墩,下设承台及群桩基

础,两岸桥台均采用重力式桥台,设计荷载为公路-I级荷载。

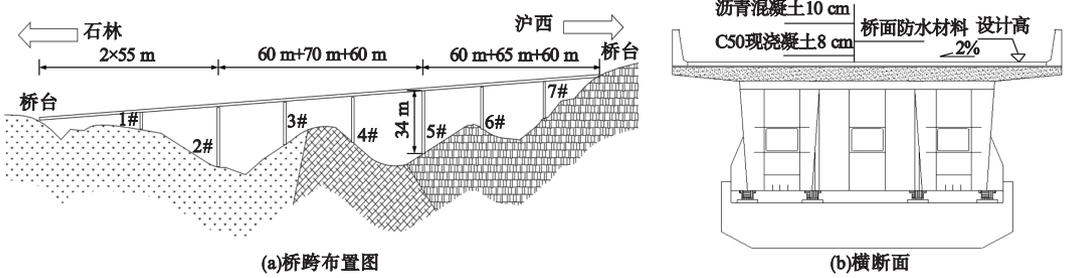


图 1 某大跨度钢-混凝土组合结构桥梁示意图

Fig. 1 Illustration of large-span steel-concrete composite structure bridge

考虑到混凝土浇筑影响工期、组合结构桥梁顶推中混凝土易开裂,因此采用先顶推槽型钢梁,待钢梁到位后原位浇筑混凝土。采用步履式多点同步顶推施工方案在石林侧桥台后设置钢梁拼装区,用于钢梁起吊拼装。设置钢梁接引区域,用于拆除钢导梁。进行槽型钢梁的制造、运输以及顶推设备布置,在拼装区域布设钢梁节段拼焊场及顶推设备。钢梁由侧方便道运输至拼装区域,拼装钢导梁,拼装完成后,往前顶推 2~3 个节间,钢梁在工厂加工制作,制作时分段单体长度为 10 m 一节,预拼后将钢梁通过便道运至起吊位置,由龙门吊或履带吊提至拼台区域,并与钢导梁连接,向前顶推钢梁。

顶推就位后将简支处下落至永久支座,连续处下落至临时支座,临时支座高度应高出永久支座高度 30 cm/25 cm;浇筑连续墩墩顶处两侧 5 m 底板 40 cm 厚混凝土;墩顶处底板混凝土与钢箱梁结合后,浇筑跨中墩顶两侧 10 m 外桥面板;待墩顶桥面板混凝土达到强度后,连续处支点下降 30 cm/25 cm。

1.2 现场静载试验方案

为评价该组合结构桥梁在设计荷载作用下的承载能力和使用状况,在成桥后进行静载试验,在最不利内力位置布载,选取桥跨第 3 跨和第 4 跨进行静载试验。根据《公路桥梁荷载试验规程》(JTG/T J21-01—2015),规定试验荷载效率 η 为

$$0.85 \leq \eta = \frac{S_s}{(1 + \mu) \cdot S} \leq 1.05. \quad (1)$$

式中: η 为静力试验荷载效率; S_s 为试验荷载作用下,截面对控制截面内力或变位最大计算效应值; S 为设计标准活载不计冲击荷载作用时产生的截面对应控制面内力或变位最不利计算效应值; μ 为冲击系数。

采用三轴载重汽车进行加载,根据各控制截面加载效率并满足试验要求下尽可能减少加载车数量的原则,采用总重 400 kN 的试验车,前轴重 100 kN、中后轴总重 300 kN,考虑中载作用下的结构受力情况如图 2 所示。试验加载时均采用分级加载,分 3 级加载。

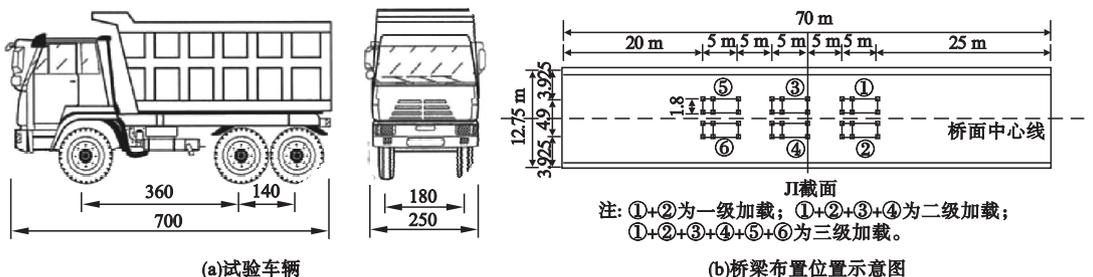


图 2 试验车辆布置

Fig. 2 Vehicle arrangement of loading test

试验测量方案见图3,挠度测试设2个截面,共9个测点,应变测试设2个截面,共4个测点。通过在钢箱梁表面黏贴电阻应变

片,匹配DH3819N静态应变测试系统进行数据采集,采用水准仪DiNi03测量各测点的挠度。

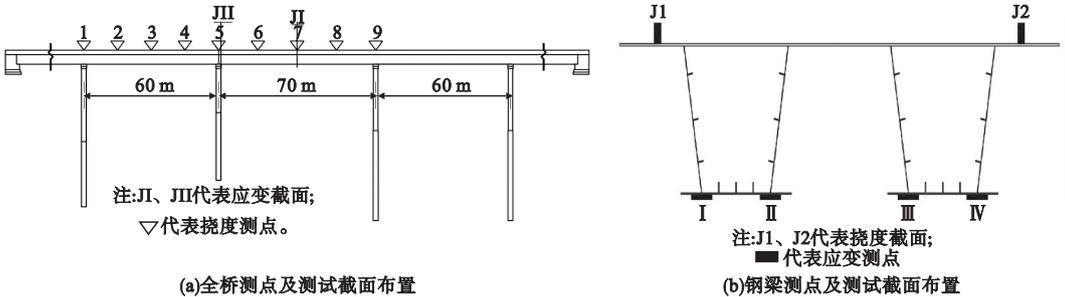


图3 静载试验加载与测量方案

Fig. 3 Loading and measurement plan in static load test

1.3 现场静载试验评价标准

根据结构校验系数、相对残余应变等对桥梁成桥阶段的性能进行评价。结构校验系数 ζ 是对比桥梁实际状况和理论状况,结构校验系数 $\zeta < 1.0$ 时,表示桥梁实际状况优于理论状况。

$$\xi = \frac{S_e}{S_s} \quad (2)$$

式中: S_e 为弹性应变或位移实测值; S_s 为应变或位移理论计算值。

相对残余应变 ΔS 越小,说明结构越处于弹性工作中,规范要求 $\Delta S \leq 20\%$ 。

$$\Delta S = \frac{S_p}{S_t} \times 100\% \quad (3)$$

式中: S_p 为残余应变或位移实测值; S_t 为应变或位移理论计算值。

1.4 现场静载试验结果分析

1.4.1 应变测试结果

相对残余应变和结构校验系数如表1所示。相对残余应变最大为1.87%,位于中载作用下的测点I和测点IV,截面各测点在中载作用下的实测应变值均小于理论值,箱梁测试截面实测应变校验系数为0.78~0.82,满足《公路桥梁承载能力检测评定规程》(JTG/TJ21—2011)中相对残余应变小于允许值20%、应变校验系数不大于1.0的要求,说明桥梁的实际状况优于理论状况。

表1 相对残余应变及结构校验系数

Table 1 Relative residual strain and structural calibration coefficient

测点序号	应变/%	结构校验系数
I	1.87	0.78
II	1.79	0.82
III	0.93	0.80
IV	1.87	0.78

1.4.2 挠度测试结果

挠度测试在该桥的第3跨和第4跨之间布置了9个测点。该桥在该工况下相应残余变形如表2所示,挠度校验系数如表3所示。中载情况下,左右两侧挠度沿桥梁横向相差不大,挠度校验系数为0.55~0.91,除桥墩处均出现了残余变形,最大值为18.0%,满足《公路桥梁承载能力检测评定规程》(JTG/TJ21—2011)中挠度校验系数不大于1.0的要求,相对残余变形小于允许值20%,说明结构抵抗变形的性能良好。

在试验荷载作用下,桥梁测试截面的挠度和应变校验系数,相对残余挠度和应变均满足《公路桥梁承载能力检测评定规程》(JTG/TJ21—2011)中的要求,表明该桥结构的刚度和强度均满足设计活载标准公路-I级的使用要求。

表 2 相对残余变形

Table 2 Relative residual deformation

测点	中载左侧			中载右侧		
	残余值/ mm	总挠度/ mm	相对值/ %	残余值/ mm	总挠度/ mm	相对值/ %
	2	0.23	3.32	6.93	0.17	3.62
3	1.40	7.78	17.99	-0.24	6.51	-3.69
4	0.54	6.25	8.64	-0.27	4.68	-5.77
6	-0.36	-9.28	3.88	-0.25	-11.02	2.27
7	0.59	-17.07	-3.46	-0.28	-21.44	1.31
8	0.59	-10.07	-5.86	-0.19	-11.71	1.62

表 3 结构校验系数

Table 3 Structure check factor

测点	结构校验系数	
	中载左侧	中载右侧
2	0.66	0.74
3	0.83	0.88
4	0.84	0.73
6	0.55	0.67
7	0.76	0.91
8	0.71	0.77

用 C50, 钢材采用 Q345。桥墩与主梁连接采用弹性连接, 并根据实际支座的约束方向对其进行设置。选取中间桥墩位置处为固定支座, 水平方向的释放 X 约束变为单向可动支座, 垂直方向的释放 Y 约束也变为单向可动支座, 既在水平方向又在垂直方向的释放 X、Y 约束变为双向可动支座。

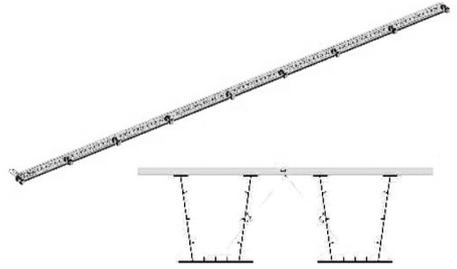


图 4 Midas 有限元模型

Fig. 4 Midas finite element model

静力荷载考虑自重和二期恒载, 二期恒载为 82.8 kN/m。同时考虑移动荷载, 共 3 条车道, 车道 1 偏心距离为 -1.55 m、车道 2 为 1.55 m、车道 3 为 -4.65 m, 车轮间距均为 1.8 m, 桥梁跨度选最大跨为 70 m, 车辆总重为 400 kN, 前轮重 100 kN, 中后轮总重为 300 kN, 车道荷载采用居中加载, 分 3 级加载。

2 有限元模拟及初应力分析

2.1 有限元模型建立

采用 Midas/Civil 软件建立桥梁的有限元模型(见图 4), 模型中纵桥向为 X 轴、横桥向为 Y 轴、竖向为 Z 轴。槽型钢梁和混凝土桥面采用梁单元模拟, 混凝土强度等级采

2.2 有限元模型验证

采用有限元模拟 3 级加载, 得到对应的应变实测结果与理论计算值如图 5 所示。

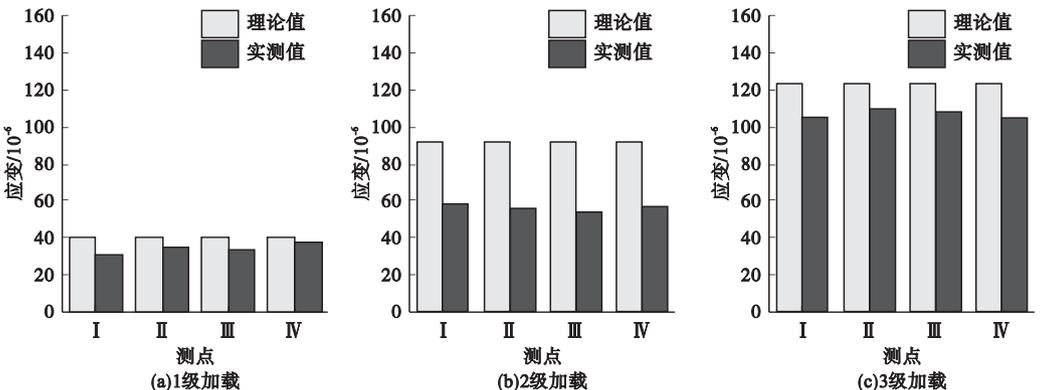


图 5 应变实测值与理论值对比

Fig. 5 Comparison of measured and theoretical strain values

从图5可知,同一截面多个测点的应变值相差不大,说明结构抗扭性能较好。1级加载应变实测值与理论值相差在25%以内;2级加载应变实测值与理论值相差在40%以内;3级加载应变实测值与理论值相差在16%以内。由于应变测量的结果受环境因素的影响较为显著,3级加载下应变实测值与理论值吻合较好,且实测值均小于理论值。

在相应加载工况下,竖向挠度的实测值与理论值对比如图6所示。实测槽型钢梁最大挠度为-19.41 mm,且实测值均小于理论

值。1级加载挠度实测值与理论值对比结果,挠度结构校验系数对比测点6,测点7相差较大,其余测点均在20%以内。2级加载挠度实测值与理论值对比结果,挠度结构校验系数对比测点7,测点8相差较大,其余测点均在20%以内。3级加载挠度实测值与理论值对比结果,挠度结构校验系数测点7相差较大,其余测点均在20%以内。由此可知,分级加载中,各级加载下挠度实测值与理论值吻合较好,这也验证了模型的可靠性。

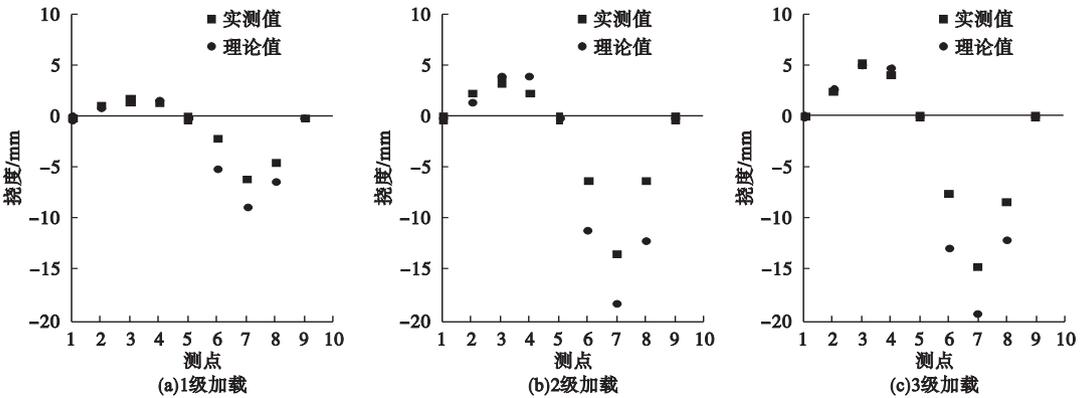


图6 挠度实测值与理论值对比

Fig. 6 Comparison of measured and theoretical deflection values

2.3 初应力分析

采用验证后的有限元模型,分析组合梁的初始应力水平(见图7)。混凝土最大拉应力在支座处,从支座处到跨中位置应力越来越小,C50混凝土轴心抗拉强度设计值为2.64 MPa,靠近支座处的混凝土拉应力大于轴心抗拉强度设计值,而跨中位置处拉应力小于轴心抗拉强度设计值,因此,在试验荷载

作用下,桥梁支座处存在开裂风险,开裂范围约为桥梁跨度的16%~38%。

槽型钢梁的最大拉应力为107.9 MPa,最大压应力为-111.4 MPa,而且最大拉应力在支座处,靠近跨中位置时应力逐渐变小,Q345抗拉与抗压强度设计值为310 MPa,槽型钢梁的应力水平约为屈服强度的36%。

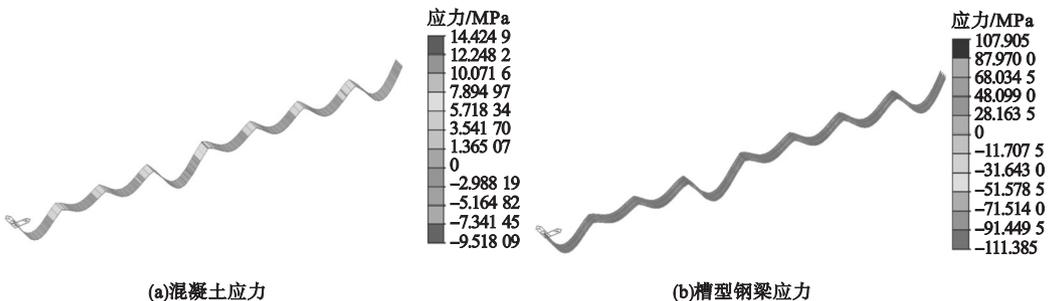


图7 钢梁的初始应力

Fig. 7 Initial stress of steel girder

3 结 论

(1) 静力荷载作用下钢-混凝土组合梁同一截面多个测点的应力值相近, 该类桥梁抗扭性能较好。应变和挠度校验系数分别为 0.78~0.82 和 0.55~0.91, 最大残余应变和残余变形分别为 1.87% 和 18.0%, 该类桥梁的实际应用状态优于设计状态。

(2) 有限元模型可以较好地模拟静力荷载作用下的组合结构桥梁的应力与挠度。不同荷载工况下, 应变和挠度的实测值与理论值大多相差在 20% 以内。

(3) 在设计荷载作用下, 钢-混凝土组合梁的中部支座附近的混凝土将发生开裂, 开裂范围约为桥梁跨度的 16%~38%, 槽型钢梁的应力水平约为屈服强度的 36%。在正常服役荷载作用下, 大跨度钢-混凝土组合桥梁成桥阶段的混凝土存在开裂风险, 但开裂范围有限。

参考文献

- [1] 聂建国, 陶慕轩, 吴丽丽, 等. 钢-混凝土组合结构桥梁研究新进展[J]. 土木工程学报, 2012, 45(6): 110-122.
(NIE Jianguo, TAO Muxuan, WU Lili, et al. Advances of research on steel-concrete composite bridges [J]. China civil engineering journal, 2012, 45(6): 110-122.)
- [2] 陈宝春, 牟廷敏, 陈宜言, 等. 我国钢-混凝土组合结构桥梁研究进展及工程应用[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(增刊1): 1-10.
(CHEN Baochun, MOU Tingmin, CHEN Yiyan, et al. State-of-the-art of research and engineering application of steel-concrete composite bridges in China [J]. Journal of building structures, 2013, 34(S1): 1-10.)
- [3] 聂建国. 钢-混凝土组合结构桥梁[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
(NIE Jianguo. Steel-concrete composite bridges [M]. Beijing: People's Communications Press, 2011.)
- [4] 刘玉擎. 组合结构桥梁[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
(LIU Yuqing. Steel-concrete hybrid bridge [M]. Beijing: People's Communications Press, 2005.)
- [5] 聂建国. 钢-混凝土组合结构原理与实例[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
(NIE Jianguo. Composite structures of steel and concrete theory and practice [M]. Beijing: China Science Press, 2009.)

- [6] 聂建国, 吴丽丽, 樊健生, 等. 槽形钢-混凝土组合梁及其应用前景初探[J]. 土木工程学报, 2008, 41(11): 78-85.
(NIE Jianguo, WU Lili, FAN Jiansheng, et al. Preliminary study of channel steel-concrete composite beam and application [J]. China civil engineering journal, 2008, 41(11): 78-85.)
- [7] 赵人达, 张双洋. 桥梁顶推法施工研究现状及发展趋势[J]. 中国公路学报, 2016, 29(2): 32-43.
(ZHAO Renda, ZHANG Shuangyang. Research status and development trend on incremental launching construction of bridges [J]. China journal of highway and transport, 2016, 29(2): 32-43.)
- [8] MICHAEL G B. Steel girder bridge field test procedures [J]. Construction and building materials, 1999, 13(4): 229-239.
- [9] EUGENE J O, ABDOLLAH M, ARTURO G. European journal of mechanics-a/solids [J]. Automation in construction, 2017, 61(1): 151-163.
- [10] 任东华, 唐英. 基于可靠度理论的桥梁荷载试验效率的研究[J]. 铁道建筑, 2013, 41(11): 5-7.
(REN Donghua, TANG Ying. Study on efficiency of bridge load test based on reliability theory [J]. Railway engineering, 2013, 41(11): 5-7.)
- [11] 田志勇, 唐茂林, 蒲黔辉. 宁波庆丰桥静、动载试验研究[J]. 桥梁建设, 2012, 42(5): 31-36.
(TIAN Zhiyong, TANG Maolin, PU Qianhui. Study of static and dynamic load tests of Qingfeng bridge in Ningbo [J]. Bridge construction, 2012, 42(5): 31-36.)
- [12] 刘荣桂, 许飞, 蔡东升, 等. CFRP 拉索斜拉桥静载试验分析[J]. 中国公路学报, 2009, 22(2): 48-52.
(LIU Ronggui, XU Fei, CAI Dongsheng, et al. Analysis of static load test for cable-stayed bridge with CFRP cables [J]. China journal of highway and transport, 2009, 22(2): 48-52.)
- [13] 王庆贺, 边涛, 吴欣荣. 小半径曲线连续刚构特大桥 0 号块精细化受力性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(4): 637-644.
(WANG Qinghe, BIAN Tao, WU Xinrong. Research on mechanical behavior of 0 # segment of long-span small radius curved continuous rigid-frame bridge [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(4): 637-644.)
- [14] 贾毅, 赵人达, 李友河, 等. 高墩大跨连续刚构桥静动载试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 35(3): 470-478.
(JIA Yi, ZHAO Renda, LI Youhe, et al. Static and dynamic load tests for high-pier long-span continuous rigid frame bridge [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(3): 470-478.)
(责任编辑: 徐玉梅 英文审校: 唐玉兰)