

桥梁支架预压形变有限元模拟与 预拱度优化设置

钱明明¹, 龙四春^{1*}, 刘茂琪¹, 赖咸根², 周健³

(1. 湖南科技大学 地球科学与空间信息工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 中国建筑第五工程局土木工程有限公司, 湖南 长沙 410011;
3. 中国建筑第五工程局有限公司, 湖南 长沙 410011)

摘要: 为研究支架预压形变规律, 优化传统预拱度设置曲线, 以长株潭西环线高架桥区间满堂支架结构预压试验为工程背景, 结合设计预压方案和现场施工情况, 选取 31-32 桥跨支架结构实测数据和模拟数据进行对比分析, 并用多项式拟合的方法对预拱度曲线进行优化设置。结果表明: 高架桥预压预拱度设置曲线并非一条平滑的二次函数曲线, 根据四次多项式拟合得到的预拱度曲线更符合现场实际工况。并用 7-8 桥跨支架结构的实测数据和拟合所得的预拱度曲线进行对比分析, 证实采用多项式拟合法优化施工预拱度曲线具有可行性, 研究结果可为类似桥梁预压施工提供参考。

关键词: 满堂支架; 有限元模拟; 预压形变; 预拱度优化

中图分类号: U248

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2024)03-0051-07

Finite Element Simulation of Preloading Deformation of Bridge Supports and Optimization of Pre-camber Setting

QIAN Mingming¹, LONG Sichun¹, LIU Maoqi¹, LAI Xiangen², ZHOU Jian³

(1. College of Earth Science and Space Information Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. China Construction Fifth Engineering Bureau Civil Engineering Co., Ltd., Changsha 410011, China;

3. China Construction Fifth Engineering Bureau Co., Ltd., ChangSha 410011, China)

Abstract: To study the preloading deformation pattern of scaffolds and optimize the traditional pre-camber setting curve, this paper uses the full-support scaffold pre-stress test of the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Western Ring Road elevated bridge section as the engineering background. Combining the design pre-stress plan with the on-site construction conditions, we select the measured data and simulate data of the 31-32 bridge span scaffold structure for comparative analysis. We optimize the pre-camber curve using polynomial fitting methods. The results indicate that the pre-camber setting curve for elevated bridges is not a smooth quadratic function curve, and the pre-camber curve obtained through a quartic polynomial fit better matches the actual on-site conditions. Additionally, by comparing the measured data of the 7-8 bridge span scaffold structure with the fitted pre-camber curve, it is confirmed that using polynomial fitting methods to optimize the construction pre-camber curve is feasible. The research findings can provide references for similar bridge preloading construction.

Keywords: full-support; finite element simulation; preloading deformation; pre-camber optimization

支架法施工^[1]广泛应用于现浇桥梁, 该施工法需先搭设支架进行荷载预压, 得到预拱度值, 再进行下

收稿日期: 2023-02-20

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(42377453); 湖南省科技创新计划资助项目(2021RC4037); 湖南省自然科学基金资助项目(2023JJ30235)

* 通信作者, E-mail: sclong@hnust.edu.cn

一步的施工。吴大宏等^[2]依据桥梁监测系统获取的位移与桥梁预拱度曲线,并利用神经网络对桥梁的预拱度曲线进行较为准确的模拟预测;周家刚^[3]对苏通大桥采用自动化技术监测,发现在横向对称的加载工况下,桥面的变形也呈对称趋势,符合力学形变规律;PEDDLE等^[4]使用 DIC(Digital Image Correlation)光学测量技术,非接触式捕获桥梁在荷载下的变形信息,并用实测数据创建桥梁的有限元模型,然后用收集的数据验证模型的准确性;孟再生等^[5]为减少有限元模拟时间,利用 Midas/Civil 软件参数建立满堂支架的有限元模型,发现模型计算值与实测值基本一致,有效模拟了碗扣式满堂支架,验证了有限元模拟的可行性;SUN等^[6]发现自锚式悬索桥主梁预拱度曲线不能在整个跨度内呈圆曲线或二次抛物线布置,于是对施工过程进行有限元分析,结果表明主梁线性存在局部凹陷,并用受力法推导了各跨竖向位移的简化计算公式;刘德清等^[7]采用 Midas/Civil 软件建立有限元模型,模拟桥梁施工工程,并结合模型在施工过程中对各种荷载工况下的预拱度值进行控制,最终成功完成混凝土梁的拼接工作。

综上所述,测量技术和有限元模拟技术广泛应用于桥梁预拱度计算分析,针对不同的工况,可采用不同的方法对预拱度曲线进行优化。本文根据长株潭城际轨道交通西环线一期工程湘船区间满堂支架预压试验,用实测数据检验模拟数据,建立合适的有限元模型,采用四次函数拟合方法对现场桥梁预拱度进行拟合优化,为桥梁施工提供一个更加合理的预拱度设置值,安全指导施工进度。

1 工程概况

长株潭西环线项目湘船区间起源于湘潭北站,向北进入潭州大道,沿潭州大道建设,该区间为地下隧道与高架桥结合区间,桥梁标准段采用 30 m 单箱单室简支箱梁,现浇承插型满堂脚手架支撑施工。西环线高架桥从西南至东北方向线路如图 1 所示,因为本文仅对该高架桥 30-31 跨和 7-8 跨做满堂支架预压试验分析,所以仅将这两跨的具体位置在图 1 中标注。

采取分级预压的方式对满堂支架进行预压荷载,分 4 次加载,分别是全部箱梁荷载的 60%, 80%, 100%, 120%^[8]。利用水袋和钢筋对其进行预压,可消除支架和地基的非弹性形变,如图 2 所示。依照《钢管满堂支架预压技术规程》(JGJ/T 194—2009)^[9],测量并记录不同预压荷载下支架和地基的沉降值^[10],求出桥梁支架的施工预拱度值。



图 1 西环线高架桥



图 2 水袋法预压

2 多参数有限元模型构建与加载

2.1 有限元模拟流程

Midas Civil 软件可以将有限元模拟技术和桥梁结构分析结合,实现满堂支架结构的设计验算工作。依据《钢管满堂支架预压技术规程》^[9],建立满堂支架的有限元模型,对其分级荷载,得到不同荷载工况下的模拟沉降值^[11],有限元模拟流程如图 3 所示。

依据施工现场实际工况,建立满堂支架有限元模型,模拟出不同预压重量下的支架和地基形变量,求出支架的模拟施工预拱度值。对于类似支架和地基条件下的满堂支架结构,可通过更改模型的尺寸大小和荷载工况,求出该桥梁支架的施工预拱度值。

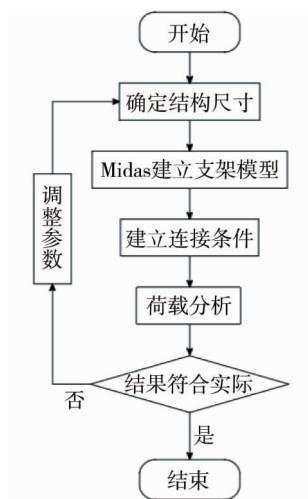


图3 有限元模拟流程

2.2 支架模型构建及荷载模拟

正确设置支架结构的自由度非常重要,结构的每个节点都具有3个平度和转动参数^[12].结构边界约束分为外部约束和内部约束,外部约束设置为节点的弹性支撑,内部边界条件主要为节点的弹性连接和释放梁端约束.支架最上层点与槽钢、槽钢与方木以及方木与红模板支架之间设置为弹性连接^[13],水平杆和斜杆两端释放梁端约束,依据现场工况和生产厂商确定的刚度值,承插式结构在y和z轴上的弯矩 M_y 和 M_z 的扭转刚度保守取值为 $20 \text{ kN} \cdot \text{m}/\text{rad}$.支架有限元模拟如图4所示.

满堂支架模型长30 m,宽13 m,采用均布荷载方式,建立全部箱梁荷载的60%,80%,100%和120%这4种预压荷载工况,其中预压到100%时设计的荷载为 $49.98 \text{ kN}/\text{m}^2$,形变结果如图5所示.从图5中可以发现支架沉降最大点位集中在纵轴中线附近,其中纵轴中线和横轴中线的交点为最大沉降点,该点沉降量为 -17.2 mm .

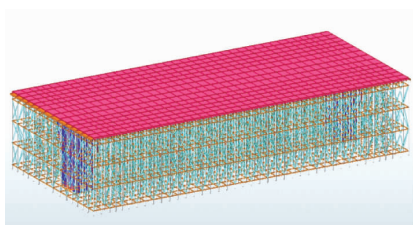


图4 支架有限元模拟模型

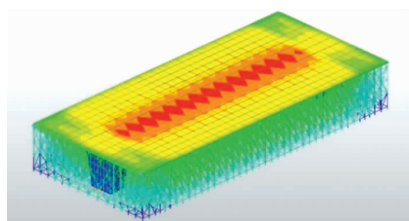


图5 荷载100%时支架形变云图

3 试验与分析

3.1 监测点布设与测量方案设置

采用水准测量的方法监测满堂支架结构荷载位移,监测时布置两类观测点,分别为支架变形观测点和地面沉降观测点.将支架结构分为5个断面,每个断面支架变形观测点个数为5个,总数为25个;每个断面地面沉降观测点个数为5个,总个数为25个.监测点布设如图6所示,其中A1~E5为支架沉降点号,1-1~5-5为地面沉降点号.

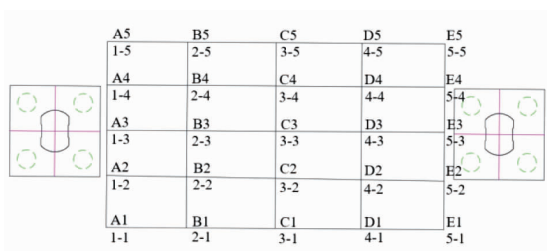


图6 监测点位布设俯视图



图7 支架沉降观测标杆尺

支架形变监测点的布置方式是用钢丝线将一根钢管从支架上端垂直悬挂下来,钢管底部悬挂一个方形的水泥块增加重量,并将钢管底部和水泥块固定在一起,再在钢管上贴上与水准仪匹配的条形码,如图7所示.地面监测点布置在支架点的正下方.

3.2 数据获取与传统施工预拱度值设置

满堂支架进行预压之前,先使用水准仪采集各点的初始值,并确保水准仪测量的数据符合精度要求.由支架形变数据,可以求出支架在荷载作用下的弹性压缩和非弹性压缩;由地面沉降数据,可以得到支架基底在荷载作用下的非弹性压缩.在规定时间内对预压点位进行监测,整理实测数据,得到30-31跨满堂支架跨中预压观测数据如表1所示.

表1 30-31跨满堂支架跨中预压结果

m

支架点号	H_1	H_2	H_3	支架弹性形变	支架非弹性形变
C1	55.505 1	55.499 9	55.502 1	0.001 1	0.001 4
C2	55.339 0	55.332 0	55.334 4	0.001 0	0.003 0
C3	55.277 6	55.265 7	55.268 7	0.001 6	0.007 3
C4	55.477 4	55.470 5	55.472 5	0.000 9	0.003 3
C5	55.403 5	55.397 8	55.399 5	0.000 6	0.002 5
地面点号	H_1'	H_2'	H_3'	地基弹性形变	地基非弹性形变
3-1	55.437 9	55.435 2	55.436 3	0.001 1	0.001 6
3-2	55.110 7	55.107 7	55.109 1	0.001 4	0.001 6
3-3	55.060 0	55.057 0	55.058 4	0.001 4	0.001 6
3-4	54.969 8	54.967 1	54.968 2	0.001 1	0.001 6
3-5	55.419 2	55.416 6	55.417 7	0.001 1	0.001 5

注: H_1 为荷载前支架高程测量值; H_2 为荷载达到120%后支架稳定时高程测量值; H_3 为卸载6h后支架稳定时高程测量值; H_1', H_2', H_3' 分别为与 H_1, H_2, H_3 对应的地基高程测量值.

在对支架进行预压的情况下,支架在荷载的作用下会产生挠度,为抵消挠度的影响,需要进行预拱度值的设置^[14].预拱度值由4部分组成:支架在荷载作用下的非弹性形变,记为 f_1 ;支架在荷载作用下的弹性形变,记为 f_2 ;地基在荷载作用下的非弹性形变,记为 f_3 ;地基在荷载作用下的弹性形变,记为 f_4 .各形变值的计算公式为

$$f_1 = (H_1 - H'_1) - (H_3 - H'_3); \quad (1)$$

$$f_2 = (H_3 - H'_3) - (H_2 - H'_2); \quad (2)$$

$$f_3 = H'_1 - H'_3; \quad (3)$$

$$f_4 = H'_3 - H'_2. \quad (4)$$

各形变值的结果见表1.对于未预压跨,预拱度 f 如式(5)所示.由实测跨中预拱度 f 和跨长 L 可得到预拱度曲线的表达式^[15]如式(6)所示.

$$f = f_1 + f_2 + f_3 + f_4; \quad (5)$$

$$y = \frac{4f(L-x)x}{L^2}. \quad (6)$$

式中: x 为求算点离跨左端的距离; y 为 x 对应的预拱度值.

由表1中的数据 and 式(5)可得未预压跨的最大竖向挠度 $f_{\max} = 11.9$ mm.根据《钢管满堂支架预压技术规程》^[9]要求,当结构自重和荷载产生的最大竖向挠度超过跨径的 $1/3\ 600$ 时,即简支梁跨径为30 m,最大竖向挠度大于8.3 mm时,应设预拱度.本文试验的简支梁最大竖向挠度为11.9 mm,大于8.3 mm,所以需设置预拱度.

3.3 实测与模拟结果对比

为了验证满堂支架模型的正确性,将25个支架形变监测点在不同荷载工况下的实测数据和模拟数据进行对比,如图8所示.

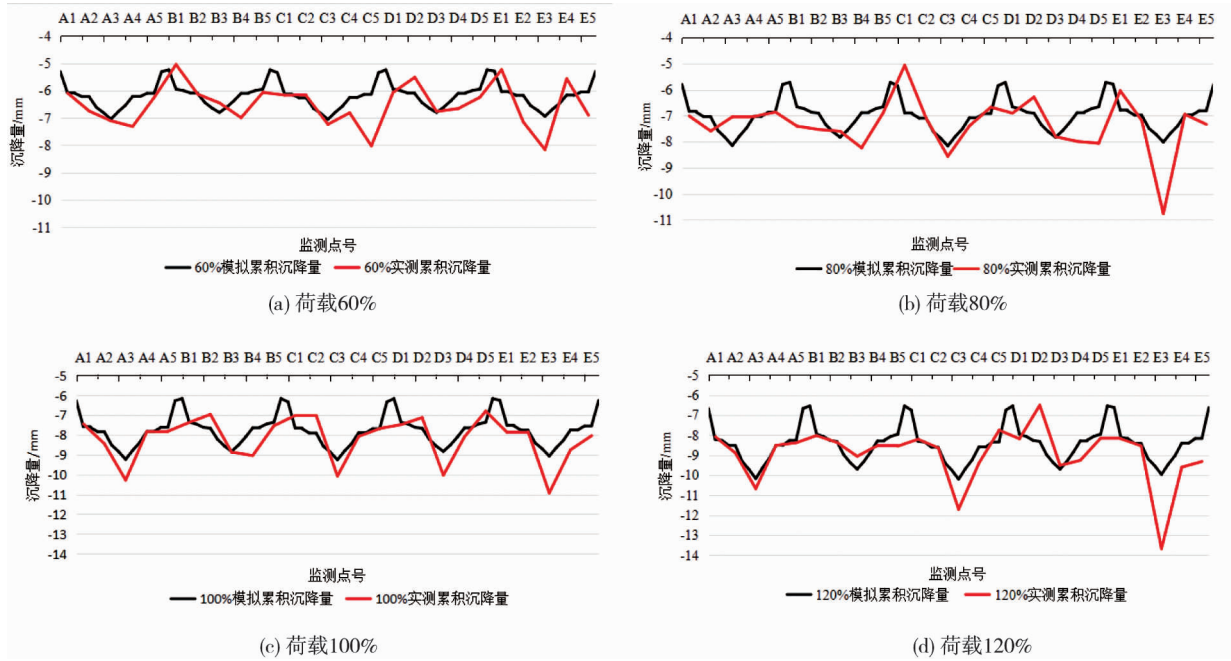


图8 不同荷载下支架沉降的模拟数据与实测数据对比

由图8可知,支架沉降值由支架两边向支架中间依次增大,而且以中间数据为主轴两边的沉降数据有对称趋势.随着荷载的不断增大,沉降数值也在不断增大,当荷载120%时,各支架监测点的沉降值基本达到最大.并且有限元模拟结果和实测结果存在很多相似的地方,支架预压沉降监测的25个点位和模拟的相应点位的沉降数值相近,而且随着点位和荷载的变化,沉降数值大小和变化趋势基本相同.不过受测量误差和现场复杂情况影响,部分点位的模拟沉降数值和实测沉降数值相差过大,比如C3点和E3点,但是这些点位的沉降规律基本相同.通过以上分析可知,数值模型模拟结果与实际监测结果基本吻合.

4 施工预拱度拟合及检验

4.1 施工预拱度拟合优化

由本文第2部分荷载模拟可以得到该满堂支架结构各点的预拱度,取满堂支架结构中轴线方向上的数值,即表2中的模拟施工预拱度.

由传统的预拱度设置式(6)可得到简支梁的预拱度设置曲线,其曲线在桥跨中间位置对应点存在一个拐点.通过分析实测数据和模拟数据可以发现,预拱度的实际值略小于由传统公式求出的数值,并且在左右桥墩附近支架的形变趋势略微缓慢,对应在这两个位置应都存在拐点,所以由式(6)求出的预拱度设置曲线并不准确,实际情况对应的预拱度曲线更倾向为一条存在3个拐点的多项式曲线.

为了得到存在3个拐点的曲线,使用四次多项式拟合的方法^[16],设拟合目标函数为

$$\theta(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4. \quad (7)$$

调整多项式的系数 a_i ,利用最小二乘法中的目标函数,求出拟合的最优系数 $I(a)$:

$$I(a) = \min \left[\sum_{i=0}^4 (a_i x^i - y)^2 \right]. \quad (8)$$

其中多项式系数 a_i 的矩阵 $A = (a_0, a_1, a_2, a_3, a_4)^T$,求出 A 的最优值,即可得到最佳拟合曲线.

将表2模拟数据代入式(7)和式(8),可得

$$A = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.454 \times 10^{-3} \\ 2.285 \times 10^{-4} \\ 3.180 \times 10^{-4} \\ 2.069 \times 10^{-5} \\ 3.448 \times 10^{-7} \end{bmatrix}.$$

将 A 代入式(7)中,即可求得目标函数 $\theta(x)$,此时各点的预拱度即为拟合施工预拱度(见表 2),将表 2 中数据导入 MATLAB 中,利用 `corrcoef` 函数^[17] 求出模拟施工和拟合施工预拱度的相关系数为 0.978,拟合精度较高,证实了拟合多项式的可靠性.

表 2 31-32 跨各节点预拱度

节点坐标/m	模拟施工预拱度/mm	拟合施工预拱度/mm	节点坐标/m	模拟施工预拱度/mm	拟合施工预拱度/mm
0	1.24	1.42	16.88	16.83	16.70
1.88	2.16	2.02	18.76	15.41	15.20
3.75	4.72	4.01	20.63	12.73	12.86
5.63	6.63	6.92	22.50	9.34	9.96
7.50	9.34	9.96	24.38	6.63	6.92
9.38	12.73	12.86	26.25	4.72	4.01
11.25	15.41	15.20	28.13	2.16	2.02
13.13	16.83	16.70	30.00	1.24	1.42
15.00	17.46	17.21			

由表 2 中数据可知,各点模拟施工和拟合施工的预拱度值相近,支架结构两端的拟合施工预拱度值比模拟施工预拱度值大,支架结构中间部分的模拟施工预拱度值比拟合施工预拱度值大,两者数值最大相差 0.25 mm,且形变趋势一致.

为了更直观地看出各预拱度设置值的关系,将实测施工预拱度、拟合施工预拱度和模拟生成的预拱度对比,如图 9 所示.由图 9 可知,模拟沉降值和拟合预拱度设置值基本相同,并且在各个位置的沉降规律相似,但实测预拱度存在偏大的现象.通过查阅资料并对现场实际情况进行分析,认为拟合施工预拱度曲线更符合实际,所以利用多项式拟合出的预拱度曲线能较为准确地反映实际形变情况.

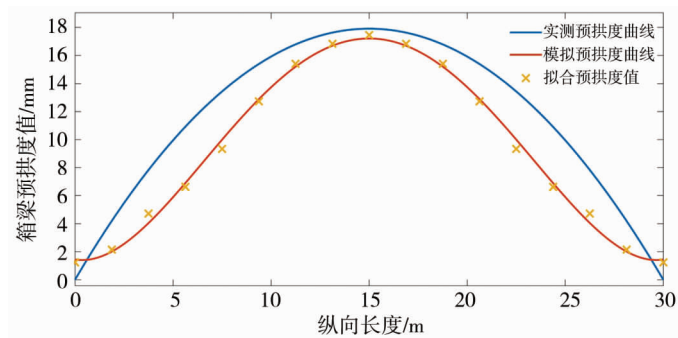


图 9 实测与拟合施工预拱度对比

4.2 试验结果检验

地铁高架桥满堂支架结构进行预压工作时,需要挑选部分桥跨支架进行试验,确保它们的承载能力符合要求,这些支架结构基本类似,可能存在长度、宽度和高度的差异.为了验证 31-32 跨拟合预拱度曲线的准确性,结合 7-8 跨的实测数据对其支架结构进行分析,更改模型的支架层数等基本参数后,按照前文同样的方法建模,同样的方法对数据进行处理,得到 7-8 跨各节点预拱度如表 3 所示.

表 3 7-8 跨各节点预拱度

节点坐标/m	模拟施工预拱度/mm	拟合施工预拱度/mm	节点坐标/m	模拟施工预拱度/mm	拟合施工预拱度/mm
0	1.19	1.35	16.88	16.39	16.22
1.88	2.08	1.94	18.76	15.06	14.82
3.75	4.58	3.82	20.63	12.35	12.49
5.63	6.43	6.73	22.50	9.02	9.57
7.50	9.02	9.57	24.38	6.43	6.73
9.38	12.35	12.49	26.25	4.58	3.82
11.25	15.06	14.82	28.13	2.08	1.94
13.13	16.39	16.22	30.00	1.19	1.35
15.00	16.94	16.68			

同理求得 7-8 跨模拟和拟合施工的两组预拱度的相关系数为 0.981,拟合精度较高,反映拟合施工预拱度和模拟生成的预拱度相近.

通过 2 个不同桥跨的监测点预拱度数据,证实多项式拟合出的预拱度曲线对该施工区域是有效可行的,并且可以起到优化传统施工预拱度的效果.

5 结论

1) 利用有限元方法可有效模拟满堂支架结构在预压工况下的形变,由软件生成的支架荷载工况下的云图能直观地反映支架各个部位在荷载工况下的形变情况.

2) 满堂支架结构预压的主要目的是确定施工预拱度值.通过模拟软件对支架结构进行参数调整,并将模拟值与实测数据对比,可以得到更为精确的模型.利用该模型生成的形变值进行多项式数据拟合,得出的预拱度曲线更符合实际工况.

3) 对于相似工况的满堂支架结构,可按文中所提出的方法求出施工预拱度曲线,其结果具有更高的精度.

参考文献:

- [1] 黄志波,何山.箱型现浇梁式桥的支架预压荷载研究[J].湖南交通科技,2017,43(3):157-160.
- [2] 吴大宏,赵人达.基于神经网络的混凝土桥梁荷载识别方法研究[J].中国铁道科学,2002,23(1):25-28.
- [3] 周家刚.自动化测量技术在特大桥梁荷载试验中的应用[J].测绘通报,2009(8):72-73.
- [4] PEDDLE J, GOUDREAU A, CARLSON E, et al. Bridge displacement measurement through digital image correlation[J]. Bridge Structures, 2011, 7(4): 165-173.
- [5] 孟再生,方诗圣,石程华,等.基于 Midas/Civil 的碗扣式满堂支架参数化建模研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2018,41(4):513-517.
- [6] SUN Y M, ZHANG W, WANG D B. Pre-camber study on the steel-concrete composite beam constructed by the incremental launching method[J]. Key Engineering Materials, 2014, 619: 43-50.
- [7] 刘德清,王文洋.大跨径钢-混混合梁连续刚构桥施工控制关键技术[J].桥梁建设,2021,51(1):121-129.
- [8] 安平和,邹晓光,时元绪,等.箱梁剪力滞翘曲位移函数理论分析[J].武汉大学学报(工学版),2020,53(8):692-697.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部.钢管满堂支架预压技术规程:JGJ/T 194—2009[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [10] 姚未正,徐克科,刘吉鹏,等.位错模型的矿区地表沉降监测[J].测绘科学,2021,46(3):32-39.
- [11] BERTOLA N J, CINELLI M, CASSET S, et al. A multi-criteria decision framework to support measurement-system design for bridge load testing[J]. Advanced Engineering Informatics, 2019, 39: 186-202.
- [12] FENG J P, ZHANG X L, ZHU Z, et al. Application on grillage method in box girder bridges[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 438/439: 886-890.
- [13] ZHAO Y, CAO X Z, ZHOU Y J, et al. Lateral load distribution for hollow slab bridge field test investigation[J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2020, 14(1): 22.
- [14] LÖHMUS H, ELLMANN A, MÄRDLA S, et al. Terrestrial laser scanning for the monitoring of bridge load tests-two case studies[J]. Survey Review, 2018, 50(360): 270-284.
- [15] 于向东,尹亮洲.连续梁桥无砟轨道标高控制研究[J].桥梁建设,2016,46(2):76-80.
- [16] 薛张芳,刘立龙,吴昊舰,等.利用 CEEMDAN 进行 GNSS-MR 雪深反演[J].大地测量与地球动力学,2022,42(1): 25-28.
- [17] GAO J, HU W, WANG R, et al. Study on a multifactor coupling accelerated test method for anticorrosive coatings in marine atmospheric environments[J]. Polymer Testing, 2021, 100: 107259.