

孟加拉国桥梁桩基荷载试验研究与应用

蒋长江¹, 江亚非¹, 邓鹏举², 谢陈奇¹

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031; 2. 中铁大桥局集团有限公司, 湖北 武汉 430050)

摘要: 以孟加拉国多哈扎里至考克斯巴扎铁路项目为依托, 探究该国东南部铁路桥梁桩基在不同地质条件与设计参数下的性能差异, 为当地铁路桥梁建设及类似国际工程提供技术支撑。采用堆载法开展静力荷载试验, 依据相关标准对9根试验桩和11根工作桩分级加载, 实时监测荷载与沉降数据, 并结合多案例对比分析试验结果。结果显示, 9根试验桩中55.6%满足沉降要求, 11根工作桩中90.9%达标, 不满足要求的桩基通过调整桩长或增加桩基数量等措施实现改进。研究结果证实, 荷载试验对优化设计参数、指导施工质量控制及不同地质区域差异化设计具有关键作用, 可有效保障桥梁工程质量与安全。

关键词: 铁路桥梁; 静力荷载试验; 现场试验; 桥梁桩基; 设计优化; 施工质量控制; 孟加拉国

中图分类号: U446.3; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)07-0398-06

Research and Application of Pile Foundation Load Tests for Bridges in Bangladesh

JIANG Changjiang¹, JIANG Yafei¹, DENG Pengju², XIE Chenqi¹

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China; 2. China Railway Major Bridge Engineering Group Co., Ltd., Wuhan 430050, China)

Abstract: Relying on the Dohazari - Cox's Bazar Railway Project in Bangladesh, the performance differences of railway bridge pile foundations under different geological conditions and design parameters in southeastern Bangladesh are explored in order to provide the technical support for the railway bridge construction in Bangladesh and similar international projects. The static load test was conducted using the surcharge method. In accordance with the relevant standards, 9 pilot piles and 11 working piles were loaded in stages to monitor the load and settlement data on real time. And combined with multi-case comparison, the test results were analyzed. The results show that 55.6% of the 9 pilot piles meet the settlement requirements, and 90.9% of the 11 working piles meet the standards. Accordingly, the piles that do not meet the requirements are improved by the measures such as adjusting the pile length or increasing the number of pile foundations. The study result confirms that the load test plays a key role in optimizing the design parameters, guiding the construction quality control and implementing the differentiation design in different geological regions, which can effectively ensure the quality and safety of bridges.

Keywords: railway bridge; static load test; field test; bridge pile foundation; design optimization; construction quality control; Bangladesh

0 引言

孟加拉国多哈扎里至考克斯巴扎铁路项目(简称“多考铁路”)位于孟加拉国东南部,是“一带一路”倡议下的重点工程,也是泛亚铁路网在孟加拉国境内的关键路线。多考铁路线路全长103.5 km,为套轨铁路,其中宽轨设计时速100 km/h、米轨设计时速80 km/h;该项目为菲迪克合同条件下的施工总承包

项目,由中孟企业组成的联合体承建。

多考铁路的桥梁全为钢梁桥,跨度为20、25、30和40 m,轴重按照印度标准25 t轴重设计。作为铁路的关键承载工程,桥梁桩基质量直接影响着铁路的质量和安全。孟加拉国东南部地处印缅板块碰撞带,地质构造复杂,以吉大港丘陵和冲积平原为主。该区域地震活动频繁,降水丰沛且水系密集,软土分布广泛,工程地质条件较差,给桥梁桩基设计与施工带来诸多挑战。静力荷载试验作为精准评估桩基性能的方法,通过模拟实际荷载,获取桩基关键性能参数,不仅是保障桥梁工程质量的必要举措,还可为孟

收稿日期: 2025-08-20

作者简介: 蒋长江(1987—),男,硕士,高级工程师,从事特殊复杂桥梁设计和国际工程总承包项目管理。

加拉铁路桥梁建设及类似国际工程提供技术支撑。

1 国内外研究与应用现状

国外在桩基静力荷载试验领域深耕多年,应用广泛。美国材料与试验协会(ASTM)制定的 ASTM D1143/D 1143M-07 标准,为全球范围内基于堆载法的深基础静载试验提供了规范化操作蓝本^[1]。在实际大型工程应用中,如美国金门大桥的维护检测和日本东京湾跨海大桥的建设,借助先进传感与自动化监测技术,实现对试验过程中荷载、位移、应变等参数的实时、高精度监测^[2-3]。长期的监测数据积累,助力深入研究桩基在复杂环境下的长期性能演变,促使桩基设计理论从传统经验模式向基于可靠度的精细化设计转变。

国内研究紧密结合工程需求,形成“规范—技术—实践”协同体系。规范层面,《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2014)对试验各环节,从前期准备、加载流程到数据处理,均作出详细规定,确保试验科学、规范开展^[4]。技术创新层面,自平衡法突破传统堆载法瓶颈,张忠苗等在杭州湾大桥超长桩检测中建立参数转化模型^[5],刘松玉团队优化软土地区反力系统,提升试验稳定性^[6]。工程实践层面,周健通过桩端后注浆试验提出承载力优化方法^[7],朱向荣明确软土地区桩基最小持载时间^[8];袁登科、周科聚焦铁路桥梁,分别提出热带季风区承载力富余量标准^[9]、列车荷载下沉降控制指标^[10]。此外,吴问兵研究孟加拉国沉积层护壁泥浆影响^[11],赵大亮分析软土地区铁路桩基受力^[12],党延兵验证后压浆工艺效果^[13],冯宇总结城市桥梁试验要点^[14],王奎华探索深厚软土桩基的试验方法^[15],郑刚研究滨海地区桩基工作性状^[16],阮庭环基于荷载传递法研究后注浆桩沉降^[17],杨兴华将双荷载箱自平衡法用于特大桥桩基优化^[18],为复杂场景提供技术支撑。

国内外丰富的研究与实践成果,为孟加拉国铁路桥梁桩基静力荷载试验提供了重要借鉴。然而,多考铁路项目为菲迪克合同条件下的总包项目,有边设计边施工的特点,再加上孟加拉国独特的地质与气候条件,决定了不能简单照搬既有经验;需立足当地实际,开展针对性研究与实践,优化试验方案,提升试验结果准确性与可靠性,同时确定合理的试验结果判定准则,以契合孟加拉国铁路建设的特殊需求。

2 基本原理

2.1 试验目的

桩基静力荷载试验旨在精准测定桩基的允许承载力、极限承载能力和不同荷载水平下的沉降特性。多考铁路的桩基荷载试验,包含试验桩和工作桩。试验桩荷载试验,通过试验结果与初步设计对比,验证设计参数选取的合理性,用于优化或改进设计。工作桩荷载试验,用于验证设计的合理性,为施工质量把控提供依据,当试验结果显示桩基承载力不足时,及时提供补救措施,确保桥梁结构满足规范承载力和沉降值要求,最终确保桥梁结构在全生命周期内安全、稳定运行。

2.2 加载与测量原理

桩基础工程中,静载试验是判定桩基承载能力和变形特性的关键环节。试验前,需依据《深基础低应变反射波法完整性测试的标准试验方法》(ASTM D 5882-07),对桩身完整性进行全面检测,排查桩身缺陷,以免影响试验结果。完成桩身完整性检测后,桩基静载试验遵循《采用堆载法对深基础进行静态轴向抗压荷载测试的标准试验方法》(ASTM D 1143/D 1143M-07)开展。

多考铁路试验采用堆载法,借助钢梁、混凝土块搭建反力系统,利用液压千斤顶对桩顶逐级施加竖向荷载,模拟桥梁运营时桩基实际受力状态。荷载量值通过高精度压力计测量,桩顶位移则依靠百分表、电子位移计等设备监测。加载全程严格遵循规范规定的加载分级与持载时间,详细记录各级荷载下桩顶位移随时间变化数据,据此绘制时间-荷载曲线、时间-沉降曲线、荷载-沉降曲线,直观反映桩基承载性能。

2.3 试验结果判定准则

桩基荷载试验需要重点关注承载力和沉降值。多考铁路合同文件对于桩基荷载试验判定准则,推荐参考《孟加拉国国家建筑规范》(BNBC)、《印度标准桩基设计与施工规范》(IS 2911)和《采用堆载法对深基础进行静态轴向抗压荷载测试的标准试验方法》(ASTM D 1143/D 1143M-07)。对于竖向抗压极限承载力,当出现桩顶沉降速率持续增大且无收敛趋势、桩顶沉降达到桩径的15%、荷载-位移曲线呈现明显陡降段等情况时,判定桩基达到极限承载状态。允许承载力基于极限承载能力,综合考虑结构重要性、地质条件、施工质量等因素,合理选取安

全系数确定,保障桩基在正常使用条件下具备充足安全储备。对于桩基沉降限值,根据合同规范及监理工程师要求,竖向荷载作用下,桩基沉降限值应满足表1规定。

表1 不同荷载下桩基沉降限值				
试验荷载	100% 设计荷载	150% 设计荷载	200% 设计荷载	250% 设计荷载
桩基沉降 限值/mm	10	15	25	37.5

3 基本原理

3.1 现场实施方案

试验前,需严格按照设计要求开展试验桩挑选工作,确保桩位、尺寸、混凝土强度等级等参数与设计图纸一致。对于试验设备,如液压千斤顶、压力计、位移计、钢梁、混凝土块等,需进行全面检查与校准,以保证设备精度符合试验要求。在桩头处理方面,采用机械切割与人工修凿相结合的方式,先剔除浮浆,然后使用高标号砂浆进行找平处理,确保桩头平整且与加载设备紧密贴合。加载平台搭建过程中,需确保其稳固可靠,先对基底砂垫层进行压实处理,再将配重块分层码放,使重心与桩身轴线重合,以保障平台能够承受试验的最大荷载。此外,需用警示带对作业区域进行隔离,对设备做好防晒、防雨及防漏油措施,在桩头处理时进行洒水降尘,废弃物按环保要求进行处置,夜间作业需配备充足照明。现场桩基荷载试验加载情况如图1所示。



图1 桩基荷载试验加载(69号P11桥墩)

3.2 加载程序

加载采用分级加载模式,按照设计荷载的特定比例逐级递增。每级荷载施加后,需维持规定时长,依规范与试验要求确定,一般为10 min至48 h不等,待桩顶位移稳定后再施加下一级荷载。达到最大试验荷载并持载一定时间后,有序开展分级卸载操作,同步记录卸载阶段桩顶位移随时间变化,获取桩基

回弹特性数据。试验桩和工作桩测试加载顺序分别如表2和表3所示。

表2 试验桩测试加载顺序		
试验荷载(设计荷载百分比)/%		荷载保持最短时间
第1循环	50	1 h
	100	1 h
	125	1 h
	150	1 h
	125	10 min
	100	10 min
	50	10 min
	0	1 h
	150	6 h
	200	1 h
第2循环	225	1 h
	250	48 h
	225	10 min
	200	10 min
	150	10 min
	100	10 min
	50	10 min
	0	1 h

表3 工作桩测试加载顺序		
试验荷载(设计荷载百分比)/%		荷载保持最短时间
第1循环	25	1 h
	50	1 h
	75	1 h
	100	1 h
	75	10 min
	50	10 min
	25	10 min
	0	1 h
第2循环	100	6 h
	125	1 h
	150	48 h
	125	10 min
	100	10 min
	75	10 min
	50	10 min
	25	10 min
	0	1 h

3.3 数据监测与记录

加载与卸载全过程,运用高精度测量仪器实时、精准监测并详尽记录荷载大小、桩顶位移和位移随时间变化情况。位移测量除记录每级荷载最终位移外,在持载期间按规定时间间隔多次测量,用于绘制位移-时间曲线,深入剖析桩的变形特性。同时,对试验数据实时分析,一旦发现异常,迅速排查原因并

采取有效措施,确保试验数据真实、可靠。

3.4 试验安全与质量控制

制定严密安全措施,保障试验期间人员与设备安全。设置醒目警戒区域,严禁无关人员进入试验现场;定期对加载设备进行检查、维护,确保设备稳定运行。质量控制方面,严格按照规范与设计规范要求试验操作,对试验数据严格审核、深度分析,保证试验结果真实、有效反映桩基性能。

4 案例分析

4.1 试验桩试验分析

根据合同条款及监理工程师的指令,本项目 1 标段选取 9 根试验桩开展试验。这些试验桩桩径 1.2 m,分布于不同桥梁位置,地质条件和设计参数存在差异,具有典型代表性,相关的测试结果如表 4 所示。

表 4 桥梁试验桩测试结果

序号	桥名	桥跨布置/m	试验桩位置	试验桩长/m	设计竖向荷载/kN	最大试验荷载/(kN,约 2.5 倍设计竖向荷载)	沉降值/mm	是否满足要求	承包商建议的工作桩长/m
1	BR-03	7×40	A1	38	2 700	6 773.3	15.964	是	38.5
2	BR-03	7×40	P6	43	4 000	10 034.5	27.514	是	43
3	BR-13	1×40	A1	32	3 200	8 027.5	104.455	否	40
4	BR-18	2×25	A1	25	2 500	6 271.5	52.544	否	32
5	BR-37	2×20	A1	25	2 500	6 271.5	35.483	是	25
6	BR-69	12×40	A1	28	3 000	7 563	25.198	是	32
7	BR-69	12×40	P11	36	4 000	10 013	20.132	是	36
8	BR-79	6×40	A2	38	2 800	7 020	72.459	否	40
9	BR-79	6×40	P1	40	3 700	9 268	50.001	否	40

注:A1、A2 为同一座桥的两个桥台,P(如“P1”)为桥墩编号。

试验结果显示,在开展试验的 9 根桩中,满足沉降要求的试验桩有 5 根,占比 55.6%;不满足要求的有 4 根,占比 44.4%。

试验桩的结果为工作桩的设计提供了重要参考。对于沉降值满足要求的桩基,看是否有较大的富余量,可以对相应的工作桩进行优化设计;对于沉降超标的试验桩,分析原因并采取相应措施改进相应的工作桩设计。以 BR-13 桥 A1 试验桩为例,其沉降远超预期,经计算分析为桩基承载力不足导致;在工作桩设计时,将桩长增加至 40 m,增强了桩基稳定性和承载能力,计算显示能满足规范要求。同时,对比不同地质条件下试验桩的性能,可为不同区域的工作桩设计提供更合理的方案。在软土地质区域,参考试验结果可采用大直径、长桩的设计形式,提高桩基对软土变形的抵抗能力。

4.2 工作桩试验分析

本项目 1 标段选取了 11 根工作桩进行荷载试验,桩径 1.2 m,沉降合格标准与试验桩一致,但最大试验荷载为设计荷载的 150%,测试结果如表 5 所示。

试验结果显示,在 11 根工作桩中,满足沉降要求的有 10 根,不满足沉降要求的有 1 根,即 BR-79 桥的 A2。对于不满足要求的 BR-79 桥 A2 工作桩,需要采取相应的补救措施。通过分析,该工作桩沉降不达标,增加桩基可以分担荷载,减少单桩承受的压力,

从而降低沉降量,确保桥梁结构的安全稳定。因此, BR-79 桥 A2 采用的改进方案为增加 2 根桩基,具体方案如图 2 所示。在实际工程中,还可根据具体情况,结合地质勘察数据和试验结果,进一步优化补救方案,如调整桩的间距、增加桩长、增大桩径等,以满足工程对桩基承载能力和沉降控制的要求。

5 荷载试验对设计施工的指导作用

5.1 为设计参数优化提供依据

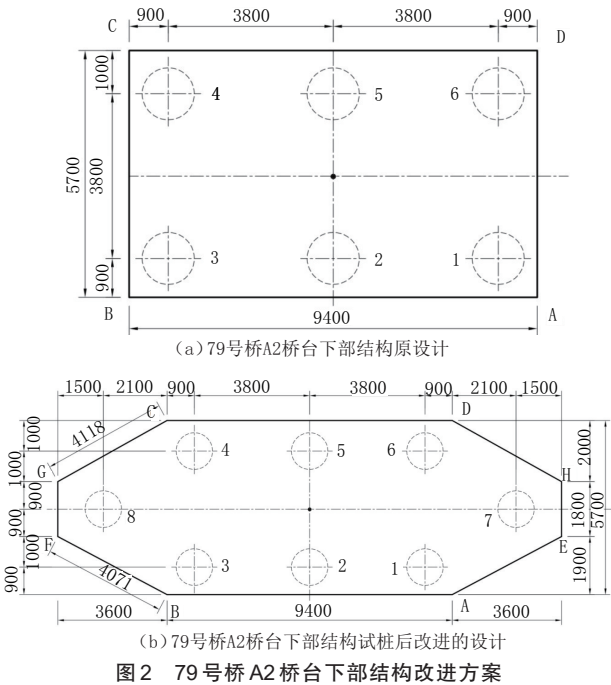
从试验桩的测试结果来看,不同桥梁位置、地质条件和设计参数下,桩基的沉降表现差异明显。如 BR-03 桥 A1 试验桩,桩长 38 m,在设计竖向荷载 2 700 kN、最大试验荷载 6 773.3 kN 作用下,沉降值为 15.964 mm,满足沉降要求。这表明在该地质条件和设计参数组合下,桩基性能良好,设计参数选取较为合理,可作为类似工程设计的参考依据。对于沉降满足要求且富余量较大的试验桩,可在后续设计中适当优化设计参数,如减小桩长或桩径,在保证安全的前提下降低工程成本。

对于沉降超标的试验桩,如 BR-13 桥 A1 试验桩,沉降远超预期达到 104.455 mm。经分析若因桩长不足导致,在后续设计中就需要增加桩长。从该桥试验桩长 32 m、工作桩长设计为 40 m 可以看出,通过增加桩长,增强了桩基稳定性和承载能力。这

表5 桥梁工作桩测试结果

序号	桥名	桥跨布置/m	工作桩位置	最终设计的工作桩长/m	设计竖向荷载/kN	最大试验荷载/(kN,约1.5倍设计竖向荷载)	沉降值/mm	是否满足要求	改进方案
1	BR-03	7×40	A2	38.5	3 000	4 515.48	5.363	是	
2	BR-07	2×25	A1	30.5	2 800	4 215.2	10.69	是	
3	BR-13	1×40	A2	34.5	3 600	5 418.59	10.458	是	
4	BR-17	2×25	P1	26	2 500	3 762.9	5.257	是	
5	BR-18	2×25	A2	32	2 500	3 764	3.206	是	
6	BR-38	3×20	A1	26.7	2 900	4 364.97	5.463	是	
7	BR-69	12×40	A2	30	3 000	4 516	14.627	是	
8	BR-69	12×40	P1	38	4 400	6 626	11.630	是	
9	BR-71	1×20	A1	32	2 800	4 199	7.800	是	
10	BR-79	6×40	A1	38.5	3 000	4 516	7.636	是	
11	BR-79	6×40	A2	41.5	3 000	4 516	16.002	否	增加桩基根数

注:A1、A2为同一座桥的两个桥台,P(如“P1”)为桥墩编号。



为设计人员在面对类似地质条件时,如何调整桩长等设计参数提供了实践依据,避免因设计参数不合理导致桩基沉降过大等问题。

5.2 指导施工过程质量控制与问题解决

工作桩的试验结果直接反映了施工质量的实际情况。本项目1标段选取的11根工作桩中,大部分工作桩满足沉降要求,但BR-79桥A2工作桩沉降不达标。这就警示施工单位在施工过程中,要严格按照设计要求进行施工,确保每一道工序的质量。对于出现问题的工作桩,如BR-79桥A2,采取增加桩基的补救措施,说明在施工过程中,当发现桩基沉降异常时,可根据试验结果及时调整设计方案,通过增加桩基分担荷载,减少单桩压力,从而降低沉降量,保证桥梁结构安全稳定。

同时,试验结果还可用于指导施工单位对施工设备和工艺进行优化。若多根工作桩在同一区域都出现类似的沉降问题,可能暗示施工设备的选型或施工工艺存在不足,需要进行改进,以提高桩基施工质量,确保桥梁工程的整体质量。

5.3 助力不同地质区域的设计施工差异化处理

通过对比不同地质条件下试验桩和工作桩的性能,为不同区域的桥梁设计施工提供了差异化方案。在软土地质区域,从试验结果可知,应采用大直径、长桩的设计形式,提高桩基对软土变形的抵抗能力。例如,在某些软土地质区域的试验桩,采用大直径长桩后,沉降控制效果良好。这为在该区域的桥梁设计施工提供了明确的方向,设计人员可根据这一结论,合理设计桩基尺寸和长度,施工单位也可据此选择合适的施工设备和工艺,提高桥梁在软土地质条件下的稳定性和安全性。

对于地质条件相对较好的区域,在保证桩基承载能力和沉降要求的前提下,可以适当减小桩长和桩径,优化设计施工方案,降低工程成本,提高工程的经济效益。

6 结论与建议

通过对孟加拉国铁路桥梁桩基荷载试验的研究与实践,可以得出以下结论:

试验桩方面,在孟加拉国特殊地质条件下,不同桥梁位置、地质状况及设计参数会使桩基沉降表现出显著差异。本项目1标段9根试验桩中,55.6%满足沉降要求,44.4%不满足。这表明部分桩基设计参数在该地质条件下存在不合理之处,同时也为后续工作桩设计提供了关键参考。

工作桩方面,1标段11根工作桩中,90.9%满足沉降要求,仅BR-79桥A2工作桩不达标。这反映出大部分工作桩施工质量符合要求,但仍有个别桩基需采取补救措施。对于不满足要求的工作桩,采用增加桩基的方案可有效降低沉降量,确保桥梁结构安全。

在“边设计、边施工、边试验”模式下,荷载试验已从单纯的质量验证手段,发展为设计与施工过程中实现动态调整的关键依据。本项目的实践经验表明:(1)设计应预留合理弹性空间。面对复杂地质条件的不确定性,设计中需在桩长、桩径、桩数等关键参数上保持适当余量,以便根据试验结果及时优化,增强设计的适应性与可靠性。(2)试验数据应实现快速闭环反馈。试验数据要及时分析并报送监理,用于指导后续桩基的设计与施工,形成“试验—分析—调整—施工”的闭环管理机制,避免同类问题重复发生。(3)构建高效的动态协作机制。设计、施工、试验等各方应建立常态化沟通机制,确保信息实时同步,推动各环节有序衔接与问题快速响应。(4)重视技术与商务的协同融合。本项目为单价合同,从承包商角度,适当增加桩长既可提高技术可靠性,也有利于提高经济效益;而监理方需兼顾成本控制,倾向于优化桩长以节约投资。这一差异促使双方通过多次沟通与谈判,寻求技术合理与经济可控之间的最佳平衡点。

在设计施工指导方面,荷载试验为设计参数的优化提供了直接依据。对于沉降满足要求且富余量较大的桩基,可合理优化参数以节约成本;对沉降超标的桩基,可通过调整桩长、桩径等措施提升承载性能。试验结果也直接支撑施工质量控制,有助于在发现沉降异常时及时调整施工方案。此外,基于不同地质条件下桩基性能的差异,实现了软土区与地质良好区域的差异化设计与施工,在保障工程安全的同时提升整体经济性。

随着孟加拉国铁路建设的发展,桩基荷载试验技术需不断进步。在技术上,引入先进监测设备和测试方法,提升试验数据准确性与可靠性;在理论上,深入研究孟加拉国特殊地质条件下桩基承载力

理,建立更符合实际的设计理论模型,确定更合理的试验结果判定准则;在工程实践中,积累经验并推广成功方案,加强施工过程质量控制,确保桥梁工程安全。

参考文献:

- [1] ASTM INTERNATIONAL. ASTM D1143/D 1143M-07 Standard Test Method for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load by Kentledge Method[S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2007.
- [2] Mohn B, Chaker A. Bridge Monitoring and Load Testing: Case Studies from the Golden Gate Bridge[J]. Transportation Research Record, 2013, 2360(1): 72-80.
- [3] JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. Technical Report on the Construction of Tokyo Bay Aqua-Line Bridge: Geotechnical Aspects [R]. Tokyo: JSCE, 2002.
- [4] JGJ 106—2014 建筑基桩检测技术规范[S].
- [5] 张忠苗,吴能松,周匡,等.自平衡法在大直径超长桩检测中的应用研究[J].岩土工程学报,2010,32(增刊2):324-328.
- [6] 刘松玉,洪振舜,童立元,等.大吨位桩基静载试验技术进展与工程实践[J].土木工程学报,2018,51(6):1-12.
- [7] 周健,朱合华,贾敏才.桩端后注浆超长桩承载特性的现场试验研究[J].岩土工程学报,2004,26(5):654-658.
- [8] 朱向荣,徐日庆,陈竹昌.桩基础承载性状的试验研究[J].土木工程学报,1998,31(2):43-49.
- [9] 袁登科,孙小猛,王新岐.热带季风地区铁路桥梁桩基础性能现场调研[J].铁道科学与工程学报,2023,20(5):1268-1276.
- [10] 周科,张昭,李军世.基于静载试验结果的铁路桥梁桩基础设计优化[J].铁道科学与工程学报,2023,20(5):1456-1468.
- [11] 吴问兵.孟加拉国沉积层地质不同护壁泥浆对桩基承载力的影响研究[J].世界桥梁,2023,51(2):8-13.
- [12] 赵大亮.软土地区铁路桥梁桩基试验及数值分析[J].路基工程,2019(6):119-122.
- [13] 党延兵,李春轩.后压浆桩基础承载性能的仿真分析与静载试验研究[J].公路,2009(6):58-61.
- [14] 冯宇.北京市五环路(三期)工程六号标段桩基荷载试验[J].公路,2005(10):22-26.
- [15] 王奎华,赵佳,梁发云.深厚软土中桩基础的现场试验研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(增刊2):4078-4084.
- [16] 郑刚,黄强兵,雷华阳.滨海地区桩基础现场试验及工作性状研究[J].岩土力学,2012,33(8):2261-2268.
- [17] 阮庭环,仉磊,徐燕.基于荷载传递法的后注浆自平衡试桩沉降特性研究[J].路基工程,2017(1):22-26.
- [18] 杨兴华,何宇,杨劲岫,等.双荷载箱的自平衡法在夏洒江特大桥桩基优化中的应用[J].世界桥梁,2019,47(1):45-49.