文章编号:1674-2869(2024)03-0349-06

高速铁路桥梁桥墩偏位成因分析与安全评估

王 康[1],洪秀勇[2],杨宏印[*1],余加仙[3],张秀成[4],郝 静[1]
1. 武汉工程大学土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430074;2. 湖北地环岩土工程有限公司,湖北 荆州 434020;3. 中交建宏峰集团有限公司,福建 莆田 351100;
4. 东南沿海工程结构防灾减灾福建省高校工程研究中心(JDGC03),福建 莆田 351100

摘 要:某高速铁路特大桥在运营期间桥墩发生偏位,其中顺桥向最大相对偏位为2.1 cm,横桥向最大相对偏位为1.3 cm,以该桥为例分析偏位成因并对结构安全性进行评估。通过对该桥梁进行脉动试验、桥墩偏位测试与监测,分析其结构本身的动力性能和桥墩偏位发展趋势;采用FLAC3D软件建立土体和桥墩结构相互作用的有限差分模型,对典型58号桥墩的墩台偏位量、桩基偏位和内力进行数值计算分析。结果表明:数值计算结果与实测结果吻合良好,桥墩偏位是由墩周堆载产生的单侧堆土推力所致;桥梁结构总体是安全的。此外,为确保高速铁路线路平顺和运营安全,对该桥墩提出了具体纠偏方案,可为类似桥墩偏位分析和处置提供借鉴参考。

关键词:高速铁路;桥墩偏位;成因分析;数值模拟;安全评估
中图分类号:U448 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202211009

Cause analysis and safety assessment of pier deviation of high-speed railway bridge

WANG Kang[1], *HONG Xiuyong*[2], *YANG Hongyin*[*1], *YU Jiaxian*[3], *ZHANG Xiucheng*[4], *HAO Jing*[1]
1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;
2. Hubei Dihuan Geotechnical Engineering Co., Ltd, Jingzhou 434020, China; 3. CCC Hongfeng Group Co., Ltd, Putian 351100, China; 4. Engineering Research Center of Disaster Prevention and Mitigation of Southeast Coastal Engineering Structures (JDGC03), Fujian Province University, Putian 351100, China

Abstract: A super large high-speed railway bridge has experienced piers deviations during operation, with a maximum relative deviation of 2.1 cm in the longitudinal bridge direction and 1.3 cm in the transverse bridge direction. We analyzed the causes of the deviations and assessed the structural safety of the bridge. The pulsation test, pier deviation test and monitoring were performed to analyze the dynamic performance of the structure and the development trend of pier deviation. The finite difference model of the interaction between soil and pier structure was established using FLAC3D software, and numerical calculations were conducted to analyze the pier deviation, pile deviation and internal force of the typical pier 58. The results show that the numerical calculation results are in good agreement with the measured results, and the pier deviation is caused by the unilateral mound soil thrust generated by the surcharge load around the pier, while the bridge structure is safe. In addition, to ensure the smooth running of the high-speed railway line and operational safety, a specific correction plan for the bridge pier was proposed, which provides a reference for the analysis and treatment of similar pier deviations.

Keywords: high-speed railway; pier deviation; cause analysis; numerical simulation; safety assessment

收稿日期:2022-11-07
基金项目:国家自然科学基金(51708429);福建省住建厅科技研究项目(2022-K-15);东南沿海工程结构防灾减灾福建省高校工程研究中心开放课题(2022009);湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划(T2020010)
作者简介:王 康,硕士研究生。Email:1017521509@qq.com
***通信作者**:杨宏印,博士,副教授。Email:yhyhust@163.com
引文格式:王康,洪秀勇,杨宏印,等. 高速铁路桥梁桥墩偏位成因分析与安全评估[J]. 武汉工程大学学报,2024,46(3):349-354.

近年来,已出现多起由于桥墩周边存有大量堆载造成桥梁桥墩偏位、桩基变位和桩基不均匀沉降的事故。如广州东江铁路大桥桥墩偏移[1]、周家冲大桥支座偏位及桥墩偏移[2]、山东某高速桥梁工程桩基偏移[3]等。桥墩周边堆载对高速铁路桥梁的安全存在严重威胁,主要体现在以下两方面:①桥墩周边堆载使桩基产生负摩擦阻力[4],使桩基承受的竖向荷载增大,结构产生不均匀沉降[5],导致结构承载力降低;②高速铁路桥梁对横向荷载非常敏感,桥墩周边堆载可能对既有桥梁的桥墩和桩基产生侧向推挤作用,使桥墩和桩基向堆土外侧方向偏移,这种偏移会导致原有路线发生改变,直接影响列车运营的舒适性和安全性。因此对桥墩周边堆载造成的桥墩偏位的研究就显得尤为重要。

目前,国内外学者通过理论分析、现场实测和数值模拟的方法研究了墩周堆载对桥梁结构产生的影响:王晓佳等[6]采用有限元软件分析堆载对桥梁基础沉降的影响,得到了堆载对既有结构变形的影响规律;刘小林[7]分析了堆载的各类属性对桩基变形、应力的影响,获得了桩基变形、应力与堆载属性的变化规律;张恒等[8]通过数值分析模拟不同堆载过程,分析认为桥墩偏位大小与堆载形成过程中的堆、挖、填顺序密切相关。但是,上述研究中的对象局限于普通桥梁,由于高速列车的行驶速度较快,高速铁路的桥梁结构不但要满足使用安全性的要求,而且路线要与运行的列车相匹配,因此必须严格控制桥面各个方向的偏位。

本文以某高速铁路特大桥为例,通过试验检测对该高速铁路桥梁桥墩的动力特性、偏位量进行分析,并通过数值仿真进一步研究桥墩及桩基的偏位和内力。根据研究结果分析桥墩偏位的原因,并从桥梁的动力性能和下部结构的承载能力两方面对桥梁进行评估,提出了桥梁后期的加固纠偏方案。

1 概 述

1.1 桥梁概况

该桥梁采用标准32 m简支T梁结构,主梁截面高1.6 m,横向采用4片T梁,T梁间采用湿接缝和横隔板连接,桥梁结构布置如图1所示。下部结构采用实体重力式桥墩、桩基础。桥墩及桩基础尺寸分别如图2和图3所示。桥梁57-60号桥墩南侧附近有大量堆土,堆土最高达7.5 m,坡脚距墩台不足5 m。桥墩位置及堆土情况如图4所示。

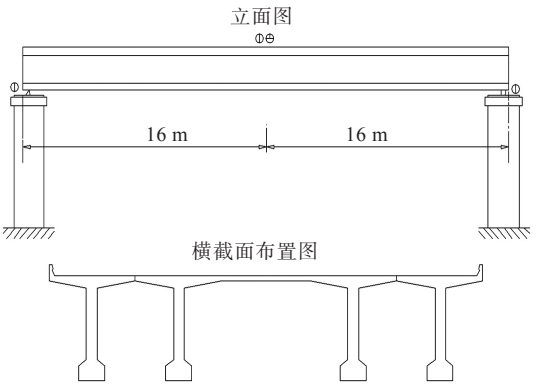

图1 桥梁结构布置

Fig. 1 Layout of bridge structure

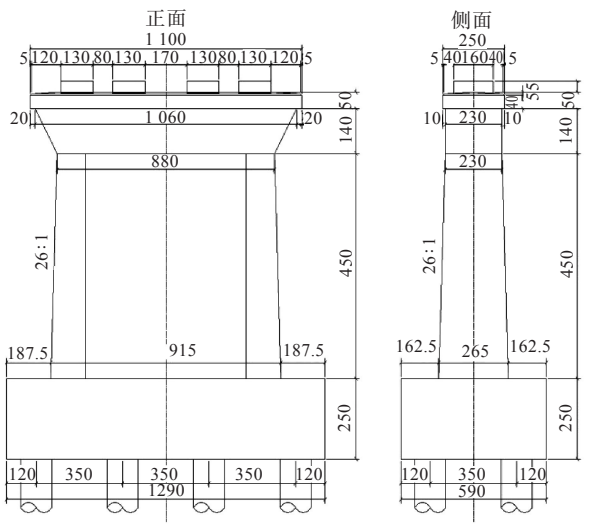

图2 桥墩结构图(单位:cm)

Fig. 2 Structural drawing of bridge pier (unit:cm)

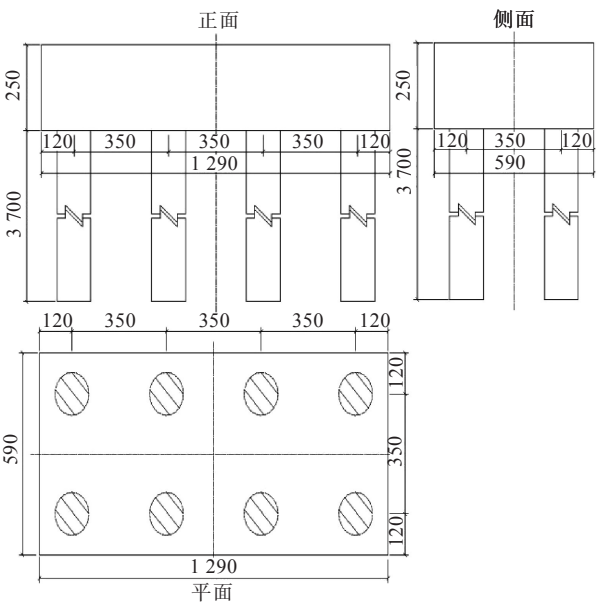

图3 承台、桩基结构图(单位:cm)

Fig. 3 Structural drawing of cap and pile foundation (unit:cm)

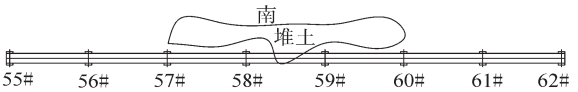

图4　桥墩位置及堆土情况

Fig. 4　Bridge piers location and soil piling

1.2　病害情况

对56号~60号桥墩间主要构件进行检测后发现桥梁主要病害为：(1)57号桥墩活动支座有明显的新滑痕(如图5所示)，58、59号桥墩固定支座临时连接件变形、活动支座有明显的新滑痕；(2)58号桥墩墩身倾斜度最大，其中顺桥向相对偏位最大为2.1 cm(墩身相对偏位为墩顶到墩底两测点间偏位的差值)，倾斜度为0.64%；横桥向相对偏位最大为1.3 cm，倾斜度为0.40%。墩身倾斜度超过《铁路桥涵施工规范》的限值(0.3%)要求；(3)57-60号桥墩梁端参照点顺桥向间距明显变化；(4)57-59号桥墩伸缩缝有明显的新滑痕。



图5　57号桥墩活动支座滑痕

Fig. 5　Sliding mark of movable support of pier No.57

2　试验检测

2.1　脉动试验

通过脉动试验对桥梁结构的动力刚度和自振特性进行安全评估。取该桥梁57-59号3个桥墩作为试验对象，每个桥墩布置1个横向传感器，梁体跨中布置2个横向传感器和2个竖向传感器，桥梁脉动试验测点布置如图6所示。

主梁一阶竖向弯曲频率实测值为4.800~4.900 Hz，计算值为4.052 Hz，实测值皆大于计算值，表明主梁竖向动力刚度满足设计要求；主梁横向振动频率实测值为5.900~6.050 Hz，根据现行铁路桥梁检定规范的规定，桥跨结构横向振幅行车安全限值f=90/L=90/32.6=2.761 Hz(L为桥梁跨度)，测试结果大于规范规定的通常值，满足规范要求。

由试验结果可知，桥梁结构的动力刚度和自振特性符合规范设计要求。

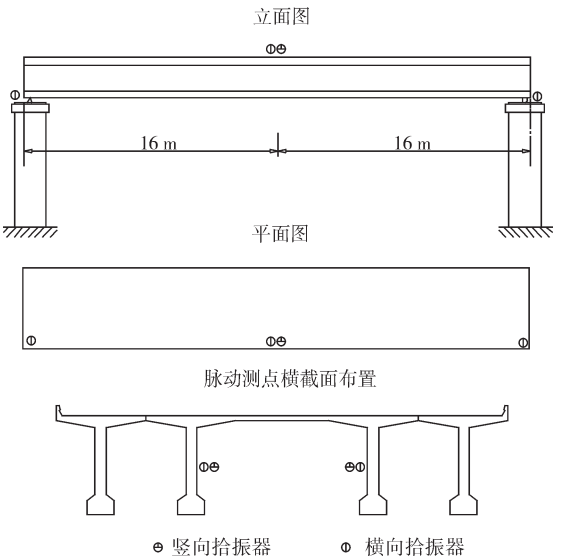

图6　桥梁脉动试验测点布置图

Fig. 6　Layout of measuring points for bridge pulsation test

2.2　桥墩偏位测试与监测

为了解桥墩偏位情况，对桥墩进行偏位测试与监测。(1)根据桥墩测点坐标，可计算出桥墩的绝对偏位量；(2)对桥墩进行连续1个月的监测，根据监测结果分析桥墩实时偏位变化情况。全桥共布置7个测点，测点布置如图7所示。

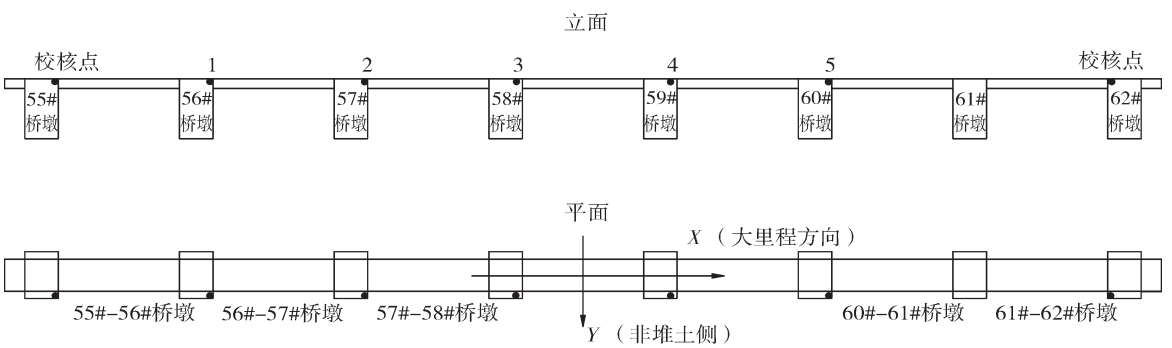

图7　桥墩偏位测试测点布置图

Fig. 7　Test points layout layout of bridge piers deviation

由于该桥55-62号桥墩位于直线段上，假定55号和62号桥墩没有变位，以这2点间连线为X轴，由路线小里程向大里程方向为正，反之为负；以垂直于X轴为Y轴，以向非堆土侧为正，反之为负。分析56号~60号桥墩横桥向和顺桥向绝对偏位情况，结果如表1所示。从表1可以看出，57号、58号、59号桥墩均有一定程度的横桥向和顺桥向绝对偏位。其中58号桥墩绝对偏位最大，横桥向为15.8 cm(向非堆土侧)，顺桥向为7.6 cm(向小里程方向)。

表1 桥墩绝对偏位测试结果

Tab. 1 Absolute deviation test results of bridge piers

桥墩	横桥向 Y		顺桥向 X	
	偏位 / cm	偏位方向	偏位 / cm	偏位方向
56号	9.0	非堆土侧	0.0	/
57号	8.0	非堆土侧	−5.3	小里程
58号	15.8	非堆土侧	−7.6	小里程
59号	9.0	非堆土侧	−1.8	小里程
60号	5.0	非堆土侧	0.0	/

为了解桥墩的实时偏位变化情况，对桥梁桥墩进行连续1个月的监测。连续1个月的监测结果表明：56-60号桥墩横桥向和顺桥向累积偏位偏差均在0.5 cm范围内，且相邻2 d偏位偏差较小，桥墩目前总体偏位已趋于稳定。

3 数值分析与评估

为研究桥梁下部结构的静力特性(桥墩应力和偏位以及桩基应力和偏位)，采用FLAC3D数值模拟软件对典型58号桥墩结构的静力特性进行分析与评估。

3.1 模型建立

对该桥58号桥墩采用FLAC3D建立土体和桥墩结构相互作用的三维有限差分模型，模型包括墩柱、支座、承台、桩基及堆土影响范围内的岩土层，并考虑上部结构的恒载影响，整体计算模型如图8(a)所示。桩采用内置的结构桩单元模拟，材料为C30，弹性模量3.0×10^{10} Pa，泊松比0.2。承台及墩柱材料与桩相同，采用实体单元，各项参数与桩相同，承台、墩身及支座计算模型如图8(b)所示。承台和土之间采用内置的接触面单元连接，接触面单元是无厚度单元。本构模型为库伦剪切模型，设置为相互接触滑移。岩土体模型的尺寸为100 m×100 m×120 m，岩土体本构关系采用摩尔-库伦模型，土体的计算参数如表2所示。将堆土场简化为均布荷载，堆土高度7.5 m，堆土分布如图9所示。

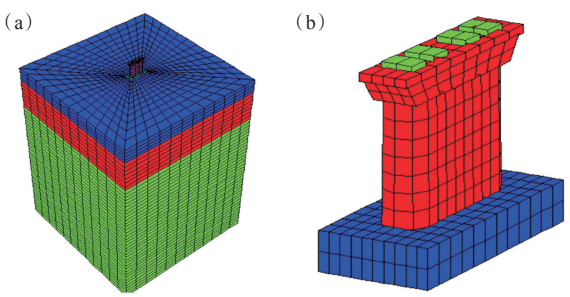

图8 计算模型：(a)整体模型，(b)局部模型

Fig. 8 Calculation models: (a) overall model, (b) local model

表2 土体的计算参数

Tab. 2 Soil calculation parameters

土层名称	厚度 / m	天然重度 / (kN/m³)	泊松比	剪切模量 / MPa	内摩擦角 / (°)	黏聚力 / kPa
淤泥质粉质黏土	9	16.8	0.42	0.898	7.9	11.7
粉砂	20	20.0	0.22	3.332	33.6	6.2
泥岩	基底	25.6	0.35	30.0	34.1	9.1

3.2 数值分析结果

3.2.1 偏位分析 (1)承台及桥墩偏位分析。有限差分计算的承台及桥墩偏位结果如下：①桥墩横桥向发生正向偏位，承台最大绝对偏位为15.64 cm，墩顶同侧的最大绝对偏位为12.18 cm。横桥向发生了倾斜，桥墩相对偏位为3.46 cm；②顺桥向的承台最大绝对偏位为−12.12 cm，墩顶同侧的最大绝对偏位为−8.80 cm。顺桥向也发生了倾斜，墩身的相对偏位为−3.32 cm。

数值模拟的58号承台及桥墩偏位计算值与现场测试值基本一致。因此，本文采用的数值模型以及计算方法均符合实际情形。可进一步利用此模型分析结构的静力特性。

(2)桩身偏位分析。桩身偏位结果如图10所示。由图10可以看出，在堆土作用下，桩身发生偏位。①桩身的横桥向最大偏位为15.21 cm，位于5-8号桩顶部(桩号如图9所示)；最小偏位为0.50 cm，位于8号桩底部，即8号桩横桥向偏位和

倾斜值最大；②桩身的顺桥向最大偏位为−12.72 cm，位于1号和5号桩顶部；最小偏位为−0.08 cm，位于1号桩底部，即1号桩顺桥向偏位和倾斜值最大。

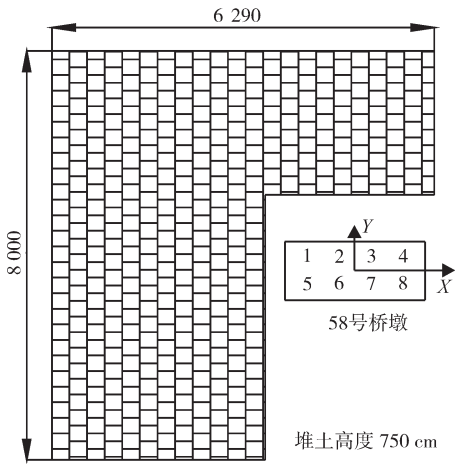

图9　堆土分布图（单位：cm）

Fig. 9　Layout of stacked soil (unit: cm)

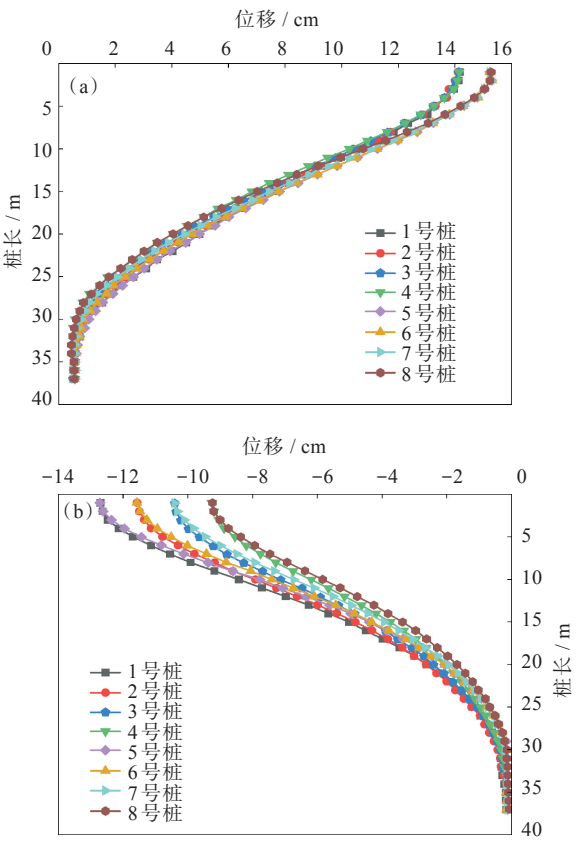

图10　桩基偏位沿深度分布图：(a)横桥向，(b)顺桥向

Fig. 10　Distribution of deviation along depth of pile foundation: (a) transverse direction, (b) longitudinal direction

桥墩、承台及桩身偏位结果表明：在堆土范围内地基土产生了较大的塑性变形，地面沉降并挤压土体侧向移动，使得桥墩的桩基础受到地基土的横向运动作用而发生侧移、沉降，桥墩也随着侧移、沉降。因此，可以认为桥墩周边堆土引起的单侧堆土推力是引起桥墩偏位的主要原因。

3.2.2　*应力分析*　承台及桥墩应力计算结果如表3所示。由表3可知，58号桥墩承台和桥墩最大压应力为竖向应力，最大应力值为−1.087 MPa，位于桥墩与承台交接点处。拉应力较小，分布在横桥向，最大为0.225 MPa。

表3　58号桥墩数值计算应力汇总表

Tab. 3　Numerical calculation stress summary of No.58 pier

类型	最大应力 / MPa	
	压应力	拉应力
横桥向应力（*X*向）	−0.672	0.225
顺桥向应力（*Y*向）	−0.441	0.225
竖向应力（*Z*向）	−1.087	0.161

桩身轴力结果如图11所示。由图11可知，桩身最大轴力为−4.31 MN（压力），出现在1号桩。桥梁下部结构受力处于弹性阶段，仍有足够的承载能力。

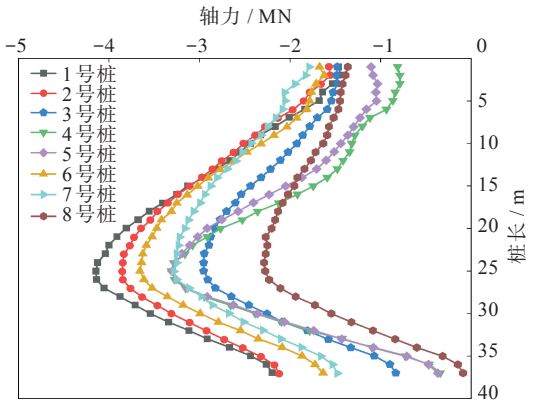

图11　桩身轴力分布

Fig. 11　Axial force distribution of pile

3.3　纠偏方案

由于桥墩墩身及桩基均发生一定程度的偏位，为保证线路运营安全性与行车舒适性提出以下纠偏方案：(1)立即对桥墩附近堆土进行清理和卸载，减少桥墩桩基的不平衡堆土推力对结构的影响；(2)定期监测56−60号桥墩和梁体的偏位，若出现较大偏位应立即采取应急措施；(3)组织施工单位在保证线路运行安全的前提下对57、58、59号墩桩基进行开挖检测，以确定桩基的受损情况；(4)待桩基受损情况核实后应立即采取相应维修加固措施，以保证桥梁运营安全。

4　结　论

本文通过试验检测，并结合数值分析，可得出

以下结论：

（1）由于桥梁施工时存留的开挖废弃堆土对桥墩所产生的单向土压力是导致下部结构出现各种病害的主要原因。经现场检测和数值计算结果综合分析，58号桥墩发生的偏位量与现场实际测量结果基本一致，可以确定桥梁桥墩偏位正是因为单侧堆土推力所致。

（2）针对58号桥墩的数值计算结果表明，桥墩最大横桥向偏位为12.18 cm，最大顺桥向偏位为8.80 cm，计算结果与实测值总体趋于一致，表明数值计算模型具有较高的精度。由于计算中仅选取单独的58号桥墩，未考虑不同跨之间梁板的制约作用，因此，顺桥向的计算结果要比实际测量的结果偏大。

（3）综合试验检测和数值计算结果评估桥梁的动力性能和下部结构承载能力，结果表明结构总体是安全的。根据该桥1个月的连续监测结果可知，桥梁目前处于稳定状态。但高铁运营对线路的线形要求较高，建议对该桥进行纠偏处治与加固。

参考文献

[1] 尹里.东江铁路大桥桥墩偏移整治工程施工监控[J].企业技术开发，2012，31(13)：65-66.

[2] 钱盈.周家冲大桥病害分析及处理[J].交通科技，2013(4)：35-37.

[3] 孙剑平，唐超，王军，等.堆载致桥梁桩基偏移机理分析与纠偏技术研究[J].建筑结构，2020，50(6)：61-67，33.

[4] 范孟华，闫保衡，朱润朝，等.堆载作用下单桩中性点位置与负摩阻力特性研究[J].河南大学学报(自然科学版)，2022，52(3)：329-336.

[5] 刘芳芳.桥梁基础不均匀沉降引起的病害分析[J].工程技术研究，2019，4(6)：28-30.

[6] 王晓佳，张启伟.软土地区地面堆载对桥梁下部结构的影响分析[J].结构工程师，2020，36(4)：145-150.

[7] 刘小林.复杂土层条件下堆载对邻近桥梁桩基受力变形的影响及控制研究[J].五邑大学学报(自然科学版)，2023，37(1)：71-78.

[8] 张恒，廖鸿钧.软土地区大面积堆载作用下邻近桥梁墩柱偏位分析研究[J].广东土木与建筑，2022，29(11)：77-80.

[9] 王彦淞.墩顶偏位下双柱式桥墩结构安全评估研究[D].雅安：四川农业大学，2020.

[10] 郭新伟.高速铁路桥墩墩顶横向水平位移控制值算法的研究[J].铁道标准设计，2012(3)：58-60，64.

[11] 范立盛.大面积堆土引起桥梁结构破坏的数值分析及影响因素的敏感性分析[D].杭州：浙江工业大学，2017.

[12] 顾津申.地面堆载对临近高速铁路桥墩沉降影响分析[J].铁道勘察，2017，43(1)：41-44.

[13] 张冀辉，王涛.高速铁路桥墩偏移整治工程线上监测及结果分析[J].测绘与空间地理信息，2016，39(6)：187-189，192.

[14] 张鸿祥，刘平利，王传先，等.基于徕卡TS30全站仪的桥墩平面位移监测应用研究[J].地理空间信息，2021，19(9)：106-108，142.

[15] 杨继承，李春轩，魏家乐.连续梁桥非连续墩偏移病害机理与防治[J].低温建筑技术，2022，44(8)：148-152.

[16] 韩东亚，曹平，林杭，等.堆载和桩顶荷载组合作用下的桩土响应分析[J].中南大学学报(自然科学版)，2017，48(1)：177-183.

[17] 吴宏业.高墩桥梁桥墩偏移病害分析与纠偏处理[J].北方交通，2019(12)：37-40.

[18] 李前名，邹向农.受地面堆载影响发生偏移铁路桥墩的修复设计[J].铁道标准设计，2012(8)：67-70.

[19] 易小峰，罗松.大偏位桥墩纠偏施工技术研究[J].交通科技与管理，2022，3(12)：135-137.

本文编辑：苗 变