不中断交通条件下大跨度跨铁路连续梁支座更换设计与施工

——以广州某大跨度跨铁路连续梁桥支座更换为例

周界龙[1]，李智鹏[2]，肖 啸[2]，王文哲[2]

（1. 广州北环智能交通科技有限公司，广州 510030；2. 中铁桥隧技术有限公司，南京 210031）

摘要：既有桥梁在运营一定时间后经常出现各种支座病害，严重影响桥梁的正常使用。以广州某大跨度跨铁路连续梁桥支座更换为背景，研究满足铁路临近营业线施工的分幅分步顶升方案。根据设计顶升方案运用有限元软件 Midas Civil进行计算分析，考虑不中断交通工况，计算得出各个支座的支座反力及顶升 3 mm 高度状态下桥梁结构的受力状态，为顶升施工提供理论依据。同时合理布置千斤顶数量，为大吨位的顶升施工积累经验，为同类型桥梁的支座更换提供借鉴。

关键词：支座病害；连续梁；支座更换；千斤顶

中图分类号：U25 **文献标志码：**A **文章编号：**1671－1807(2024)19－0296－08

桥梁支座是连接桥梁上部结构与下部结构的重要部件[1-2]，其能将桥梁上部结构的反力和变形可靠地传递给桥梁下部结构。

20 世纪 90 年代在城市规划设计时，国内建造了大批的立交桥，其中包含相当数量的跨铁路立交桥。随着交通运输行业的飞速发展，桥梁车流量远超设计车流量，加之环境腐蚀、材料磨损老化、施工安装不当等原因[3-5]，支座出现不同程度的病害。作为关键传力部件的桥梁支座需及时进行更换。

桥梁支座更换的方法根据桥梁支座的类型、梁体与墩台处操作空间大小、桥梁连续跨数以及是否中断桥梁交通等，可采用的方法较多[6-8]。本文以广州某跨铁路立交桥进行分幅分步顶升更换支座桥梁维修工程为例，提出适合该类型桥梁的支座更换设计方案，并经过有限元计算和现场施工的验证，为同类型大跨度跨铁路立交桥支座更换提供技术支持和借鉴经验。

1 桥梁概况

广州某立交桥横跨京广铁路。桥梁为双向 6 车道，左右幅分离，全桥长 700.1 m，桥面宽度 27 m，桥上不设人行道，中间设宽 1.5 m 中央分隔带。桥梁运营超 30 年。

立交桥平面设置半径 R 为 2 300、2 000 m 的圆曲线，其中两段缓和曲线在主桥上相接，相接点位于 20# 、21# 墩之间，距离 21# 墩 16.87 m。主桥桥墩均位于缓和曲线上，平面布置如图 1 所示。

如图 2～图 4 所示，立交桥主桥上部结构为跨径（60＋100＋60）m 的预应力混凝土变截面连续梁，边跨及中跨两端为单室双箱截面，用顶推法施工；中间挂孔为长 53 m 的 6 片简支 T 梁（单幅），吊装就位后通过体系转换从挂孔式悬臂梁转换成为连续梁。主梁引桥侧端部为牛腿构造，引桥 T 梁放置于主梁牛腿上。

2 支座病害及原因分析

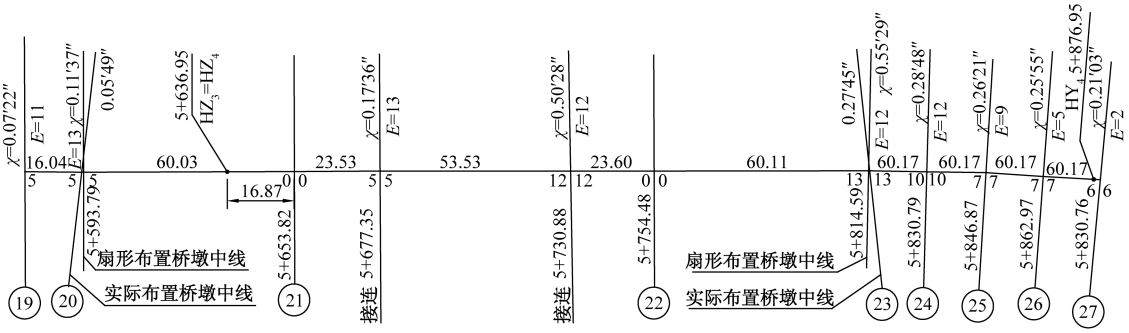
2.1 支座型号及布置形式

立交桥主桥为三跨连续梁桥，两幅分离，设 20# 、21# 、22# 、23# 4 个桥墩。其中，21# 墩墩顶设置 8 个固定支座，20# 、22# 、23# 墩墩顶分别设置

收稿日期：2023-11-02

基金项目：中国中铁股份有限公司科技研究开发计划(2022-专项-04)

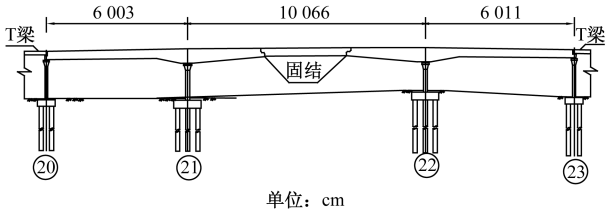
作者简介：周界龙(1993—)，男，河南灵宝人，助理工程师，研究方向为路桥建养技术；李智鹏(1994—)，男，山西运城人，硕士，工程师，研究方向为桥梁结构维修加固改造；肖啸(1998—)，男，湖南娄底人，硕士，高级工程师，研究方向为桥梁结构加固施工；王文哲(1996—)，男，山东临沂人，硕士，工程师，研究方向为桥梁结构运营及加固。



单位：m

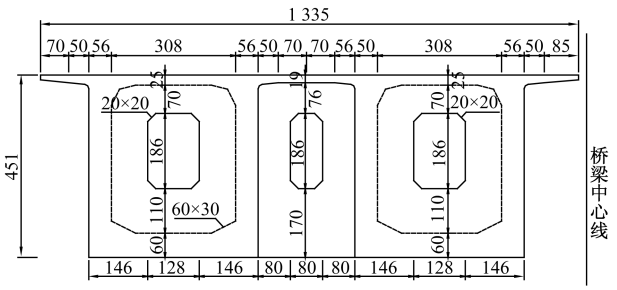
χ 为路线偏转角；*E* 为外距；HZ 为缓直点；ZH 为直缓点；HY 为缓圆点

图 1　主桥平面曲线布置图



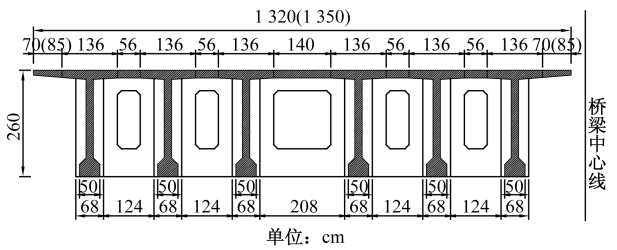
单位：cm

图 2　广北立交桥主桥立面图



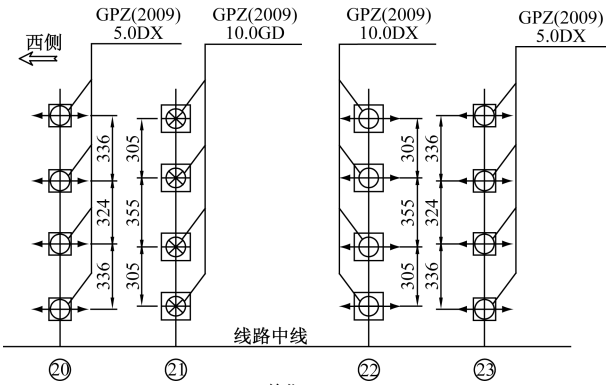
单位：cm

图 3　1/2 主桥箱梁横截面图(21# 、22# 墩顶)



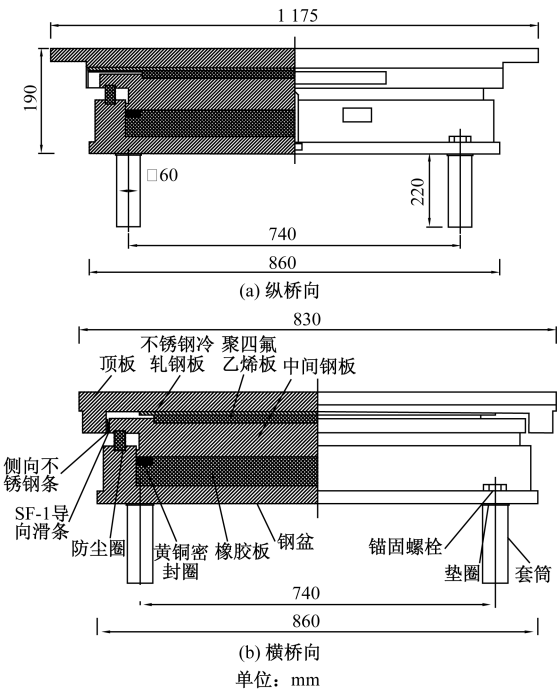
单位：cm

图 4　1/2 主桥跨中 T 梁横截面图



单位：cm

图 5　桥梁支座布置现状示意图



单位：mm

图 6　22# 墩盆式橡胶支座构造图

8 个纵向活动支座，支座类型为盆式橡胶支座。具体支座型号及布置形式如图 5 所示。

22# 墩支座尺寸及构造如图 6 所示，20# 、23# 墩支座尺寸及构造如图 7 所示。

2.2　支座病害

支座病害有：①固定支座钢盆开裂，橡胶外露(图 8)；②支座少量橡胶被挤出(图 9)；③支座顶板

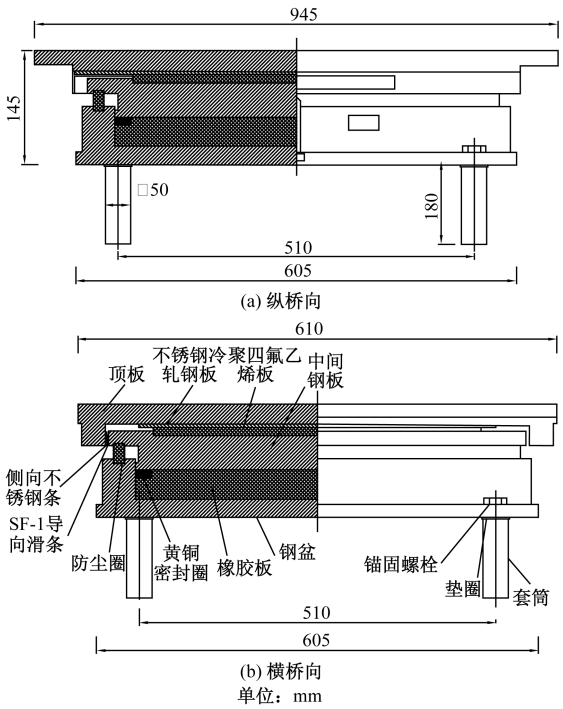


图 7　20#、23# 墩盆式橡胶支座构造图

图 8　钢盆开裂，橡胶外漏

轻微变形，变形量 5～10 mm(图 10)；④纵向活动支座滑移受限，横向抵死(图 11)；⑤支承垫石侧面均存在竖向裂缝(图 12)。

2.3　病害原因

(1)固定支座钢盆开裂。主桥固定支座已经使用超 30 年。钢盆开裂的具体时间不详。综合支座受力状态及运营状况分析，固定支座钢盆开裂可能的原因是该支座安装偏差大，与其他固定支座间受力不均匀或存在不正常受力(超载车辆冲击及振动作用)。

(2)盆式橡胶支座橡胶挤出。①橡胶密封圈设置不合理或未设置引起；②支座安装不水平，导致支座受力不均，局部受压导致橡胶直接被压坏。

(3)单向活动支座导向条侧向抵死。①同一桥墩设置 4 套单向活动支座，内外侧支座间距约 10 m，在温度荷载作用下，内外侧支座间距最大横向活动量可达 5 mm。该横向伸缩可能会导致支座导向条抵死；②主桥位于缓和曲线上，在温度作用下距离固定支座最远的 23# 墩顶主梁径向(横桥向)位移可达 3 mm，同时在混凝土收缩徐变及活载作用下，主梁变形变位复杂可能导致支座横向抵死；③支座安装时横桥向活动预留量不一致或偏差等可能会导致支座横向抵死。

3　设计方案

3.1　总体设计思路及原则

(1)基于支座病害情况，主桥 32 个支座全部更换，新更换支座采用与原设计一致的支座布置形式。

(2)主桥支座更换后固定墩支座采用盆式橡胶支座；20#、22# 及 23# 墩支座采用球型支座，新更换支座的承载能力、允许转角等指标不低于原设计标准。支座顶底钢板的总体尺寸不超过原设计支座的相应尺寸。

(3)主桥为连续梁结构，且经过多次维修加固，为保证结构安全，采用分幅分布顶升方案。

(4)结合支承垫石处理，顶升高度以能够实现支座更换为度量标准，顶升高度为 3 mm。

3.2　顶升方案

主桥主梁采用分幅分步顶升方案。即先同步顶升 21#、22# 墩，支座更换完成后，再逐墩顶升 20#、23# 墩。单幅桥支座更换完成后，再进行另一幅桥支座更换。

顶升过程中，纵桥向各顶升点间相对高差不得超高 1 mm，横桥向各顶升高差不得超过 0.5 mm。

3.3　千斤顶布置

3.3.1　20#、23# 墩千斤顶布置

同一墩号半幅桥设置 4 个支座，每个支座竖向承载力 5 000 kN，根据支座的竖向承载力和支反力大小，并适当考虑安全系数，主桥边墩 20#、23# 墩分别布置 24 个 200 t 千斤顶，每个千斤顶理论顶升力 41.2 t。千斤顶具体布置如图 13、图 14 所示。

3.3.2　21#、22# 墩千斤顶布置方案

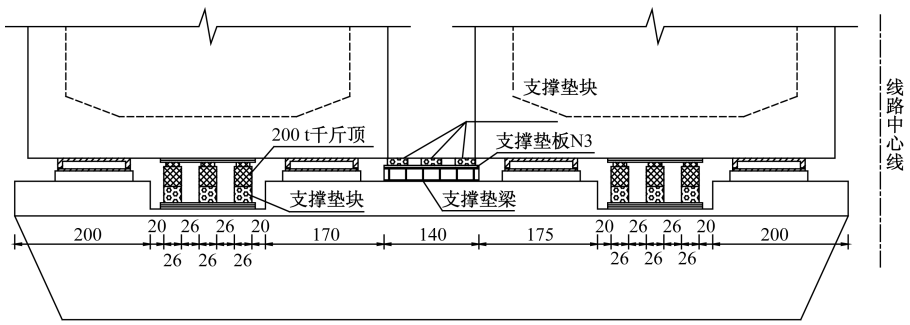
21#、22# 桥墩墩帽上布置有 4 个支座，每个支座竖向承载力 10 000 kN，根据支座的竖向承载力和支反力大小，并考虑千斤顶富余量，主桥主墩 21#、22# 墩分别布置 30 个 200 t 千斤顶，每个千斤顶理论顶升力 108.4 t。千斤顶具体布置方案如图 15、图 16 所示。

图 9　橡胶被挤出

图 11　横向抵死

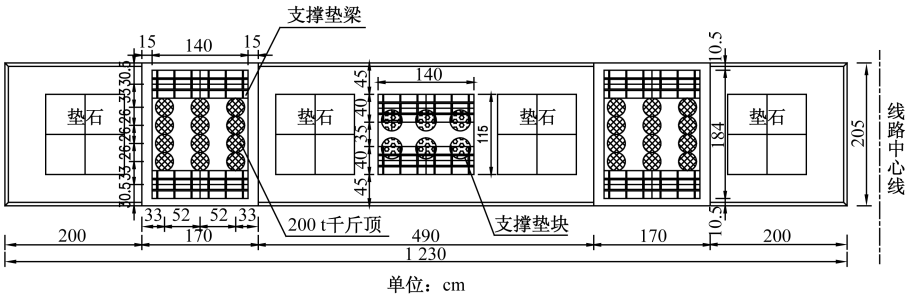
图 10　顶板变形

图 12　垫石开裂



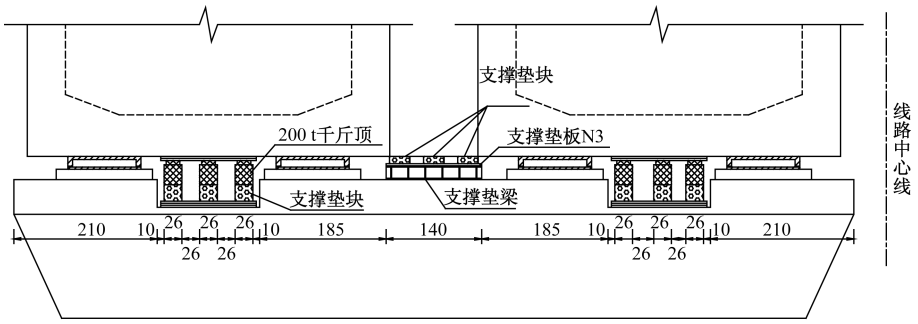
单位：cm

图 13　20# 、23# 墩千斤顶布置立面图(单幅)



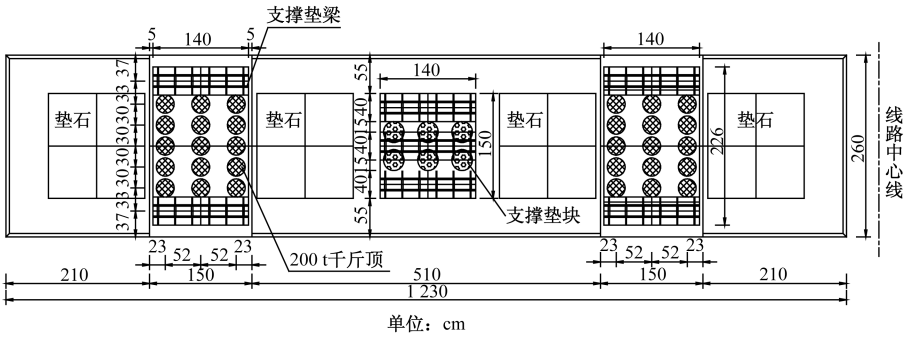
单位：cm

图 14　20# 、23# 墩千斤顶布置平面图(单幅)



单位：cm

图 15　21#、22# 墩千斤顶布置立面图



单位：cm

图 16　21#、22# 千斤顶布置平面图

4　有限元计算分析

4.1　支反力计算

4.1.1　模型建立

有限元模型如图 17 所示。

(1)材料：50 号混凝土。

(2)边界条件。Midas 软件中按照支座实际高度在模型中建立支座上下节点。主梁支座处节点设为主节点，支座上部节点设为从节点，将主梁节点与支座上部节点刚性连接。支座上部节点与下部节点采用弹性连接，并按支座实际约束方向进行刚度设置。支座下部节点采用一般支承中的固定约束。

(3)荷载。①自重；②桥面铺装：0.15 m×13.2 m×25 kN/m^3=49.5 kN/m；③车挡：0.24 m^2(截面积)×25 kN/m^3×2(两侧)=12 kN/m；④引桥(跨度为 16 m，取 8 m 长度计算)传递至边墩支座荷载；⑤车挡(25 号钢筋混凝土)：7.7 m^3×25 kN/m^3=192.5 kN；⑥桥面铺装：0.15 m×13.2 m×8 m×25 kN/m^3=396 kN；⑦主梁：55.25 m^3×25 kN/m^3=1 381.25 kN；⑧移动荷载：汽-超 20；⑨预应力：预应力钢束规格为 9～7φ5 钢绞线，每束截面面积为 13.5 cm^2，张拉力为 1 791 kN，张拉方式为两端张拉；波纹管直径为 75 mm；⑩支座强制位移：21#、22# 墩顶升 3 mm。

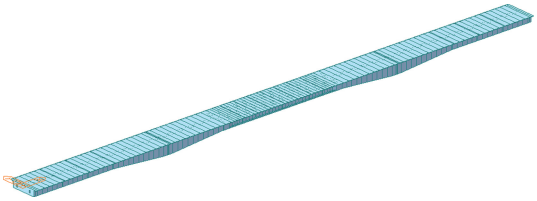


图 17　有限元模型

4.1.2　支反力计算结果

通过有限元建模计算，支座反力计算结果见表 1。

表 1　支座反力计算结果

墩号		恒载/kN	活载/kN	恒载+活载/kN
20#	边支座 1	2 069	544.4	2 613.4
	中支座 1	1 964	400.3	2 364.3
	中支座 2	1 927	400.3	2 327.3
	边支座 2	2 042	544.4	2 586.4
21#	边支座 1	6 506	1 152.9	7 658.9
	中支座 1	7 815	863.6	8 678.6
	中支座 2	7 795	863.6	8 658.6
	边支座 2	6 387	1 152.9	7 539.9
22#	边支座 1	6 471	1 152.9	7 623.9
	中支座 1	7 848	863.6	8 711.6
	中支座 2	7 817	863.6	8 680.6
	边支座 2	6 356	1 152.9	7 508.9
23#	边支座 1	2 045	527	2 572.0
	中支座 1	1 982	387.5	2 369.5
	中支座 2	1 913	387.5	2 300.5
	边支座 2	2 059	527.0	2 586.0

在恒载和活载作用下，各支座理论最大支反力均小于相应支座承载力。

4.2 横隔板受力计算

4.2.1 有限元模型

20# 墩（半幅）横梁截面尺寸为 800 mm×2 600 mm，21# 墩（半幅）横梁截面尺寸为 800 mm×4 500 mm。

边界条件：千斤顶顶升时，需保证主梁在 X、Y、Z 3 个方向上均不产生位移，因此在有限元计算时约束千斤顶位置处的 3 个方向的平动自由度。

荷载：横梁自重；上部结构恒载及活载传递至支座处的荷载施加在腹板位置处。

横梁约束及荷载分布如图 18 所示。

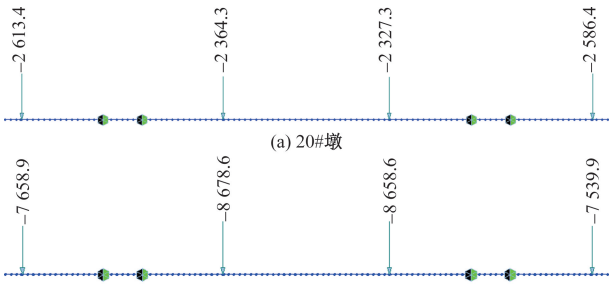


图 18 20#、21# 墩边界条件及荷载分布

4.2.2 横梁内力计算

有限元计算 20# 墩及 21# 墩横梁弯矩如图 19 所示。

经计算，顶升时 20# 墩横梁最大负弯矩为 3 885 kN·m，21# 墩横梁最大负弯矩为 11 248 kN·m。

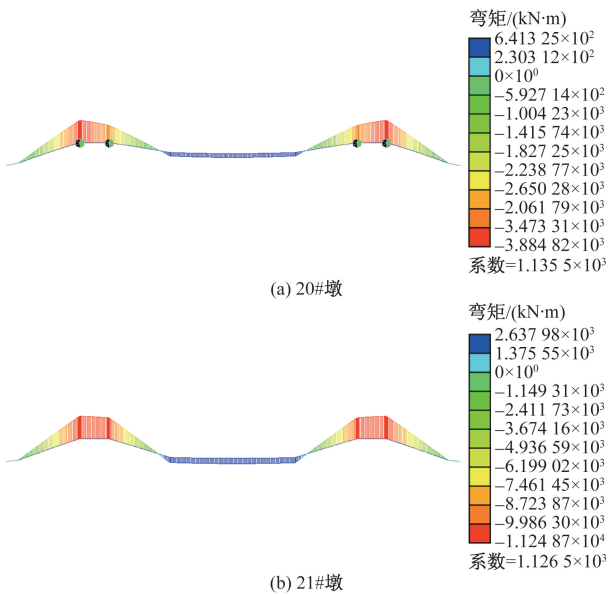


图 19 20#、21# 墩横梁弯矩图

4.2.3 裂缝宽度验算

（1）20# 墩横梁。依据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362—2018）第 6.4.3 节，钢筋混凝土构件最大裂缝宽度 W_{cr} 计算公式为

$$W_{cr}=C_1C_2C_3\frac{\sigma_{ss}}{E_s}\left(\frac{c+d}{0.30+1.4\rho_{te}}\right)=0.071\ \text{mm} \tag{1}$$

式中：C_1 为钢筋表面形状系数；C_2 为长期效应影响系数；C_3 为与构件受力性质有关的系数；σ_{ss} 为钢筋应力；E_s 为弹性模量；c 为最外排纵向受拉钢筋的混凝土保护层厚度，mm；d 为纵向受拉钢筋直径，mm；ρ_{te} 为纵向受拉钢筋的有效配筋率。

顶升时 20# 墩横梁裂缝宽度小于规范容许值 0.2 mm。

（2）21# 墩横梁。依据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362—2018）第 6.4.3 节，钢筋混凝土构件最大裂缝宽度计算公式如式（1）所示，结果为 0.074 mm。顶升时 21# 墩横梁裂缝宽度小于规范容许值。

4.3 顶升状态主梁受力计算

同步顶升 21#、22# 墩处主梁 3 mm，主墩墩顶及跨中 T 梁应力变化见表 2。

由表 2 可知，在同步顶升 21#、22# 墩处主梁 3 mm时，主梁主要截面应力变化最大为 0.7 MPa。

由表 3 可知，顶升 20#、23# 墩处主梁 3 mm 时，主梁主要截面应力变化最大为 0.13 MPa。

表 2 同步顶升 21#、22# 墩主梁截面应力变化

位置	应力/MPa					
	21# 墩		中跨跨中		22# 墩	
	上缘	下缘	上缘	下缘	上缘	下缘
原状态	−1.1	−2.9	−4.6	−5.7	−2.4	−1.8
顶升 3 mm	−1.2	−2.9	−5.3	−6.4	−2.4	−1.8
变化量	0.1	0	0.7	0.7	0	0

注：应力符号以正为拉应力，负为压应力。

表 3 顶升 20#、23# 墩主梁截面应力变化

位置	应力/MPa					
	21# 墩		中跨跨中		22# 墩	
	上缘	下缘	上缘	下缘	上缘	下缘
原状态	−1.1	−2.9	−4.6	−5.7	−2.4	−1.8
顶升 3 mm	−1.2	−2.7	−4.5	−5.6	−2.5	−1.6
变化量	−0.13	0.12	0.02	0.02	−0.13	0.12

注：应力符号以正为拉应力，负为压应力。

5 施工关键流程

步骤 1：按设计要求摆放千斤顶及临时支撑，连

接 PLC(可编程逻辑控制器)同步顶升系统,做好顶升准备工作,如图 20 所示。

步骤 2:按设计要求进行试顶升,试顶升期间应加强对顶升设备、支撑系统、油表油管系统的检查和检测,均调试合格后方可实施正式顶升,如图 21 所示。

步骤 3:主梁分级同步顶升,顶升高度 3 mm,顶升过程中注意随时超垫临时支撑,如图 21 所示。

步骤 4:拆除支座,凿除支承垫石,凿除垫石过程中注意保护垫石与墩帽间的连接钢筋,如图 22 所示。

步骤 5:墩帽顶侧面开槽,安装支座预埋套筒,安装新支座,如图 23 所示。

步骤 6:主梁回落,保证落梁后梁底标高与顶升前一致,如图 23 所示。

步骤 7:按设计要求绑扎钢筋网,架立模板,浇筑灌浆料并按规范要求养护垫石,如图 24 所示。

步骤 8:待垫石强度达到规范要求后,拆除临时支撑、千斤顶、垫石模板,如图 25 所示。

6　施工亮点

为保证桥梁在顶升状态下不中断交通,采用滑动体系顶升主桥 20# 、22# 、23# 墩。支座的每个

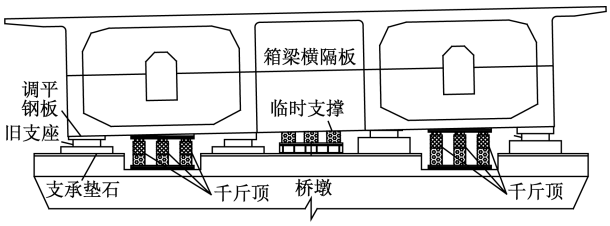


图 20　支座更换步骤 1 示意图

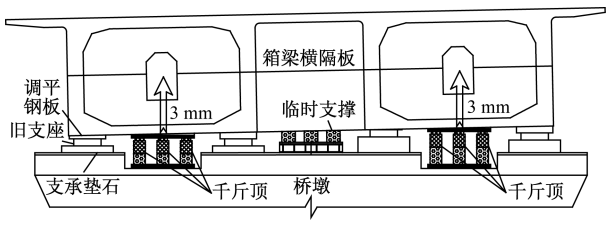


图 21　支座更换步骤 2、步骤 3 示意图

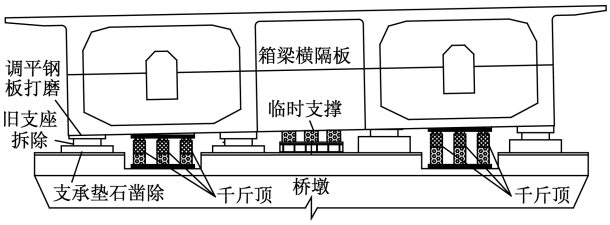


图 22　支座更换步骤 4 示意图

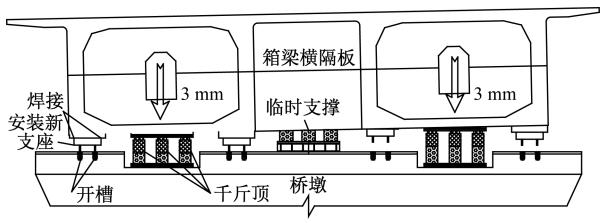


图 23　支座更换步骤 5、步骤 6 示意图

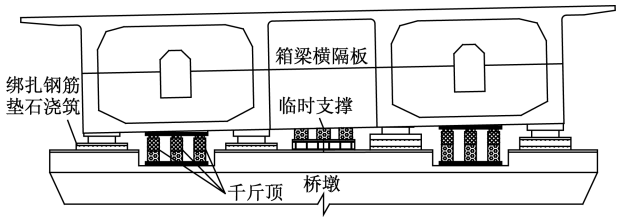


图 24　支座更换步骤 7 示意图

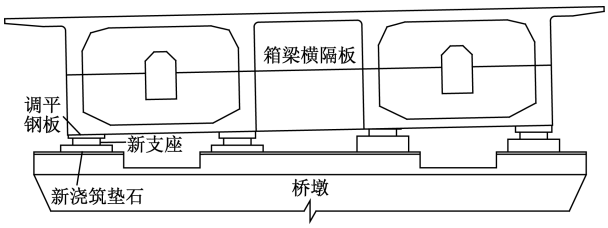


图 25　支座更换步骤 8 示意图

墩台同一梁底的千斤顶顶面保证水平,活动支座的千斤顶顶面的钢垫板要求沿滑移方向分设 3 组长条形的滑动体系,滑动体系布置原则(自上而下):2 cm 钢垫板+0.5 cm 不锈钢板+0.7 cm 四氟乙烯滑板+2 cm 钢垫板组合(四氟乙烯滑板及不锈钢板要采取有效固定措施:限位块),其余调平钢垫板也应尽量按照厚板、少层原则设置,试顶完成后调平钢垫板进行固结。

参考文献

[1] 宋福,石秋君,班新林,等. 高速铁路简支箱梁盆式橡胶支座更换方法研究[J]. 铁道建筑,2014,54(7):34-38.

[2] 崔海. 某铁路钢桁梁桥支座病害整治设计及施工关键技术[J]. 中外公路,2019,39(2):169-172.

[3] 石秋君. 既有铁路桥梁支座病害分析及改造方法[J]. 铁道建筑,2017,57(10):12-14.

[4] 令狐勇生. 大秦重载铁路桥梁整治技术深化研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2015.

[5] 王悦. 三盛公特大桥辊轴支座整治技术[J]. 铁道建筑,2017,57(5):34-36.

[6] 张仁根. 简支转连续梁桥支座更换新技术研究[J]. 公路,2011(8):84-88.

[7] 朱强. 大跨径连续梁桥支座更换的研究[D]. 广州:华南

理工大学，2012.
[8] 马志华，帅飞跃，俞红升. 同步顶升法更换桥梁支座实例分析[J]. 施工技术，2014，43(11)：61-63.
[9] 罗永巍. 通车工况桥梁顶升支座更换施工技术研究[J]. 四川建材，2023，49(9)：92-94.
[10] 郑杰森. PLC同步顶升技术在桥梁支座更换中应用研究[J]. 运输经理世界，2022(35)：107-109.
[11] 任新建，任登富，张志新，等. 城市轨道交通桥梁支座更换同步顶升受力检算分析[J]. 山西建筑，2022，48(10)：157-162.
[12] 江玮，刘丽敏. 桥梁支座更换分步顶升施工探讨[J]. 交通世界，2022(S1)：103-104.
[13] 由旭伟. 不中断交通下的公路桥梁支座更换施工技术研究[J]. 交通世界，2021(25)：71-72.
[14] 黄胜. 大桥维修加固工程支座更换施工技术[J]. 黑龙江交通科技，2021，44(7)：263-264.
[15] 刘兴祖，杨思傲，余敦旻. 不封闭交通情况下桥梁同步顶升研究[J]. 城市道桥与防洪，2021(5)：197-199.
[16] 覃捷. 旧桥整体同步顶升及支座更换施工技术探讨[J]. 西部交通科技，2020(2)：110-113.

Design and Construction of Continuous Beam Supports Replacement for Long Span Railway under Continuous Traffic Conditions: Taking the Replacement of the Support of a Long-span Railway Continuous Beam Bridge in Guangzhou as an Example

ZHOU Jielong[1], LI Zhipeng[2], XIAO Xiao[2], WANG Wenzhe[2]
(1. Guangzhou Beihuan Intelligent Transportation Technology Co., LTD., Guangzhou 510030, China;
2. China Railway Bridge and Tunnel Technology Co., LTD., Nanjing 210031, China)

Abstract: The existing prestressed concrete continuous box girder bridge often has various bearing diseases after a certain period of operation, which seriously affects the normal use of the bridge. Taking the replacement of the support of a large-span railway continuous beam bridge in Guangzhou as the background, a segmented and step-by-step lifting scheme is adopted to meet the construction requirements of the railway near the business line. According to the design of the lifting plan, finite element software Midas Civil was used for calculation and analysis. Considering uninterrupted traffic conditions, the support reaction forces of each support and the stress state of the bridge structure under the lifting height of 3 mm were calculated, providing a theoretical basis for lifting construction. At the same time, the number of jacks should be reasonably arranged to accumulate experience for large-tonnage lifting construction and provide reference for the replacement of bearings for similar bridges.

Keywords: bearing disease; continuous bridge; support replacement; lifting jack