DOI:10.14048/j.issn.1671－2579.2019.03.033

基于分步顶升法的桥梁支座更换应用研究

李明哲[1]，刘世忠[1]，陈明权[2]

（1.兰州交通大学 土木工程学院，甘肃 兰州 730070；2.厦门市市政建设开发有限公司）

摘要：城市桥梁在建设运营数年后，由于桥梁支座寿命较短，会出现橡胶老化、支座脱空、钢板锈蚀等问题。该文以某市市府大道南北桥支座更换工程为例，利用大型通用有限元软件Ansys对分步顶升法支座更换施工进行仿真分析及理论研究，并通过与应变、位移等现场实时监控数据进行对比监控，有效地解决了不中断交通施工过程中桥梁成为全漂浮体系及高压水管的运营安全。

关键词：支座更换；分步顶升法；不中断交通；高压水管；Ansys软件

近几年，桥梁建设高速发展，有相当数量的桥梁建成通车，同时也有部分桥梁建设运营时间长，桥梁支座出现脱空、破损、锈蚀、橡胶老化等问题，造成支座失效，导致支座无法正常工作，从而影响桥梁结构的使用及安全，必须及时进行维修，更换有缺陷支座，以改善桥梁结构的受力性能，延长桥梁运营寿命。

目前，中国大多采用桥梁整体同步顶升的方法进行桥梁支座更换施工，但此方法需要封闭道路、中断交通，不宜用于交通流量较大的桥梁。该文主要介绍采用分步顶升法进行支座更换施工解决不中断交通的难题，并对其进行理论分析及现场监控数据对比。

1 概述

某市市府大道南桥、北桥为三孔不等跨预应力混凝土连续变截面箱梁桥，桥梁的跨径组合为22.4 m（边）＋32 m（中）＋22.4 m（边）。该桥横向由三幅桥组成，均为直桥，现限载40 t，建成于1994年。依据2017年的《某市工程检测中心有限公司检测报告》发现该桥支座出现橡胶老化、钢板锈蚀等问题，需要对该桥进行维修改造。在保证结构安全、施工时桥梁正常运营的前提下，尽可能通过顶升技术控制桥梁支座更换施工。

桥梁上部构造为单箱单室变截面预应力混凝土连续梁桥，采用C50混凝土。中幅桥梁顶宽15.6 m，跨中及梁端主梁中心线处梁高1.2 m、底宽6.60 m、底板厚0.22 m，墩顶处梁高2.2 m、底宽5.94 m、底板厚0.40 m。边幅桥梁顶宽10.6 m，跨中及梁端主梁中心线处梁高1.0 m、底宽5.63 m、底板厚0.18 m，墩顶处梁高2.0 m、底宽4.97 m、底板厚0.30 m。箱梁在中支点处设置厚1.0 m的横隔板，梁端支座处设置厚0.7 m的横隔板，跨中设置厚0.5 m的横隔板（图1）。

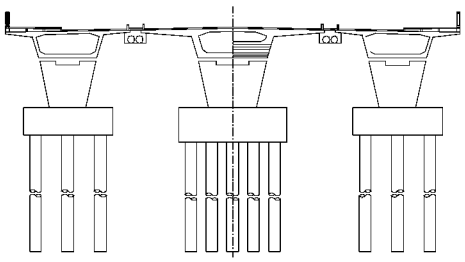

图1 桥梁整体布置示意图

2 桥梁顶升方案

市府大道南桥、北桥地处繁华路段，交通流量特别大，由于施工工期较长，在整个桥梁支座更换施工过程中，不得封闭道路影响车辆及行人正常通行，且桥下有高压水管与梁体连接，桥台处作业空间狭小以及桥梁周围工作空间限制无法安装桥梁限位装置，所以造成桥梁支座取换困难，难以操作。

根据桥梁的实际特点，制定合理的施工方案，以保证桥梁结构在施工过程中的安全及运营。

2.1 顶升施工技术

由于不中断交通施工且桥梁周围空间有限，桥梁无法安装主梁纵、横向限位装置，主梁整体顶升后，梁

收稿日期：2018－05－17

作者简介：李明哲，男，硕士研究生.E－mail:909696864@qq.com

体在施工过程中将成为全漂浮体系。因而桥梁结构有发生滑移的风险。为防止梁体因无限位措施而成为全漂浮体系，采取分步顶升法进行梁体顶升，从而完成桥梁支座更换。

分步顶升法：利用 PLC 同步顶升设备，先同时顶升三幅桥 1# 台、2# 墩位置处梁体，将 3# 墩、4# 台位置处支座作为限位装置（图 2），更换 1# 台、2# 墩支座，支座更换完毕后再同时顶升 3# 墩、4# 台位置处梁体（图 2），进行 3# 墩、4# 台位置处支座更换施工，此时，1# 台、2# 墩位置处支座作为桥梁顶升的限位装置。顶升过程中，油压千斤顶进行分级同步顶升，每次顶升约 2 mm，每级顶升到位后，稳定 5 min，在稳定期间检查梁体状态，多次顶升后使梁体顶升高度达到预定设计值。

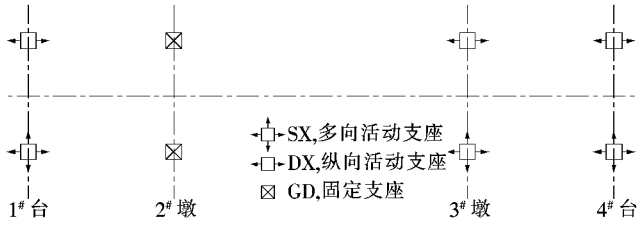

图 2　支座限位示意图

2.2　同步技术原理

PLC 控制液压同步系统由液压系统（油泵、油缸等）、检测传感器、计算机控制系统等几个部分组成。液压系统由计算机控制，可以实现力和位移控制、操作闭锁、过程显示、故障报警等多种功能。

该系统能够实现施工作业的分散布置、集中操作，既能满足多液压缸载荷不均同步升降，又能对顶升过程中各监测点进行实时监控，实现桥梁的力－位移双闭环控制。对顶升过程中各顶升点进行实时数据采集，将监测数据不断与安全限值进行对比，以确定并执行各千斤顶的下一步工作。系统位移同步精度可达到 ±0.5 mm。控制功能完善，可实现手动控制，自动控制，可任意选择受控点，任意输入控制值。并且该系统可防止偏载，即当顶升或下放过程中，如果某一点不受力，系统可迅速发现并控制虚点顶升使全部油缸均匀受力。通过电子控制系统控制液压泵实现桥梁在精确位置控制下的顶升和下降。每台液压泵通过本身装置的液控单向阀，控制顶升结构下落，并当顶升设备的液压管道遇到意外破损泄漏时，防止结构意外坠落。

顶升前将同一桥台（墩）的液压千斤顶并联起来，以利用同一台油泵进行加压以保证每台千斤顶的顶升力相同。通过缓慢加压，控制三幅桥的同一位置处的墩台顶升位移相同，确保同一幅桥的桥台、桥墩位置处的梁体位移量相同的同时，保证三幅桥处于同一水平面，以达到同步顶升的目的。

3　桥梁顶升仿真计算

3.1　桥梁分步顶升原理

根据该桥的结构形式，并参考设计院的意见，采用分步顶升法进行桥梁顶升。考虑到该工程的工期、成本等问题，确定在不中断交通的情况下进行施工。

根据桥梁结构自重及其在通车时最不利静活载作用所产生的支反力，确定在边幅桥台位置处布置两组千斤顶，每组有 3 个千斤顶，每组顶升力为 3 000 kN，中支点桥墩位置处布置两组千斤顶，每组有 6 个千斤顶，每组顶升力为 7 500 kN；在中幅桥台位置处布置两组千斤顶，每组有 4 个千斤顶，每组顶升力为 4 500 kN，中支点桥墩位置处布置两组千斤顶，每组有 8 个千斤顶，每组顶升力为 9 000 kN（且保证其安全系数为 1.5 以上）。

顶升时将同一桥台（墩）上的千斤顶并联起来，通过一台油泵进行缓慢加压，以确保每台千斤顶出力一致。先同时顶升 1# 台、2# 墩处梁体，分级同步顶升，每级顶升 2 mm，顶升到位稳定 5 min，期间检查是否同步，不同步随时调整，然后进行下一步顶升。更换 1# 台、2# 墩处支座完毕后，落梁，再同时顶升 3# 墩、4# 台处梁体，更换支座。

3.2　有限元模型的建立

利用 BIM 软件建立三跨连续梁 1∶1 空间模型。通过 PARA 文件将 BIM 软件所建桥梁模型导入有限元分析软件 Ansys 中，根据有限元分析原则，将桥梁实际材料属性赋予桥梁模型，并利用 SWEEP 命令进行实体单元网格划分，将所建几何模型转化为有限元实体单元模型。并根据实际情况对有限元模型施加边界条件。

3.3　顶升位移预警值的确定

由于在不封闭交通条件下进行桥梁顶升施工，所以桥梁梁体顶升高度不得过高，以防止发生阻碍交通及严重跳车的问题。并且顶升施工中不得出现梁体拉应力超限，即各种工况下拉应力增量不超过 C50 混凝土的最大拉应力 1.525 MPa（C50 混凝土的最大拉应力为 1.83 MPa 并取 1.2 的安全系数）。所以必须进行详细的多工况计算得出顶升施工的位移预警值，并根据详细、可行的施工方案及监控流程，做到实时监控，

既保证交通畅通又不影响更换支座施工，保证桥梁梁体结构安全。

桥梁顶升仿真计算是计算桥梁实体单元模型在支座位置处发生强迫位移时的应力增量，通过应力增量的大小来判断桥梁顶升限值。汽车荷载按规范中的车道均布荷载标准值 10.5 kN/m 的要求，以面均布荷载的形式施加在梁体顶面。表 1 为同步顶升 1# 台、2# 墩仿真计算数据。

表 1 仿真工况计算结果

桥位	顶升位置	顶升高度/mm	顶升位置梁顶应力/MPa	最大应力/MPa	最大应力所在位置
边幅桥	1# 台、2# 墩位置处梁体同步顶升	5	0.246	0.418	3# 墩箱梁底板处附近区域
		8	0.393	0.670	
		10	0.491	0.837	
		15	0.737	1.256	
		20	0.983	1.675	
中幅桥	1# 台、2# 墩位置处梁体同步顶升	5	0.197	0.521	3# 墩箱梁底板处附近区域
		8	0.314	0.834	
		10	0.393	1.043	
		15	0.590	1.564	
		20	0.786	2.086	

由表 1 可知：中幅桥边、中支座处梁体顶升 15 mm 时，最大拉应力增量为 1.564 MPa；边幅桥边、中支座处梁体顶升 20 mm 时，最大拉应力增量为 1.675 MPa。进行梁体顶升时，应力与刚度成正比，中幅桥刚度大，所造成中幅桥的应力增量大于边幅桥的应力增量，从而边幅桥顶升最大限值高于中幅桥。

通过对仿真计算的分析、不封闭交通的考虑以及三幅桥同步顶升的施工安排，将梁体顶升最大限值定为 15 mm，并将 10.5、13.5 mm 分别作为黄色、红色预警值，最大拉应力所在截面作为监测控制截面。施工期间在桥面伸缩缝位置铺设钢板以免发生跳车。

3.4 高压水管仿真计算

梁底有高压水管与梁体通过托架焊接相连，并且高压水管两端与桥台混凝土固结在一起。在桥梁顶升过程中，由于高压水管被动顶升，若处理不当，容易造成高压水管破裂及桥台混凝土破碎。通过建立有限元实体单元仿真模型及其弹性支撑，分析在顶升过程中高压水管与桥台混凝土互相作用的应力大小及其影响范围。

通过多工况计算分析发现，从桥台开始 22 m 范围解除梁体对高压水管约束的条件下，当梁体顶升至 15 mm 时，高压水管在与梁体未解除约束开始处附近区域出现最大拉应力增量为 11.257 MPa，桥台混凝土在连接处出现最大拉应力增量为 0.517 MPa。此时桥梁顶升施工对高压水管的影响较小，且对与高压水管的施工处理较为容易。

在顶升前将从桥台开始 22 m 范围内的高压水管托架进行托换，解除梁体对它的刚性约束，以临时支架作为其弹性支撑，每隔 2 m 进行托换。为避免临时支架平台下沉，应在施工平台的基础上对支架进行局部加密，并在支架托换前进行预压试验，模拟高压水管重量，以消除弹性变形。

4 支座更换施工

更换支座采用千斤顶同步顶升边跨主梁后更换。为了确保桥梁支座更换顺利完成，在同步顶升作业期间同时对顶升过程中主梁控制截面应力变化及千斤顶顶升梁体高度进行实时监测。在桥墩台位置处安装精度为 1‰ mm 的光栅尺作为梁体竖向位移同步监测设备，并在控制截面布置应变片，作为顶升过程中应力同步监测控制传感器。建立同步实时监控跟踪系统，严格控制梁体的同步顶升高度和速度。

支座更换施工流程：① 搭设施工平台及高压水管支架；② 安装 PLC 同步顶升设备及监控设备；③ 试顶；④ 正式顶升；⑤ 更换支座；⑥ 回油卸顶、落梁；⑦ 拆除支架。

顶升期间，各个观察点应及时反馈观察情况，各个测量点及时反馈测量数据，计算机控制顶升量如与监

控数据存在差异，及时认真分析并进行调整。实时监控梁体应力变化，观察桥梁结构是否出现裂缝、偏移，认可其工作状态后方可进行下一级顶升。顶升总行程应由所有支座松动留作抽取旧支座空间作为控制条件，并且控制在所确定的桥梁顶升限值范围内。

南桥顶升监控部分数据如表 2 所示。

表 2　南桥顶升监控部分数据

桥位	顶升位置	顶升高度/mm	控制截面应力值/MPa	支座更换时间
东幅桥	同步顶升 1# 台、2# 墩位置处梁体	13.012	0.834	2017 年 11 月 29 日至 12 月 1 日完成支座更换
中幅桥		13.108	1.012	
西幅桥		12.993	0.821	
东幅桥	同步顶升 3# 墩、4# 墩位置处梁体	14.142	0.945	2017 年 12 月 24 日至 12 月 7 日完成支座更换
中幅桥		13.976	1.204	
西幅桥		13.997	0.938	

注：2017 年 12 月 2 日至 12 月 3 日为顶升及监控设备转场时间。

将梁体顶升至能满足支座取出的高度后，解除旧支座与梁体、墩台之间的螺栓约束，卸除旧支座，清理桥墩台及梁体表面，对新支座比照原支座进行钻孔处理，将新支座运送到位后，调平处理，紧固螺栓，固定支座位置。对于锈蚀严重，不易进行拆卸的支座，进行切割拆除。

当支座更换施工完毕后，经复核梁体位置与原设计位置一致后，即可进行落梁。

5　结论

利用同步顶升技术进行支座更换施工，于 2017 年 11 月 29 日至 12 月 7 日完成南桥支座更换工作，于 12 月 11 日至 12 月 19 日完成北桥支座更换工作。

（1）通过有限元仿真计算，优化了施工方案，将原施工单位所定整体顶升高度仅需 8 mm 即可完成更换工作的方案，更改为分步顶升限值 15 mm，从而增加了施工空间及更换支座的可操作性。

（2）在施工过程中，必须进行第三方监控，与第三方监控数据进行比对，实时控制梁体顶升高度及应力变化。实测应力数据与理论数据进行对比，一旦位移或应力达到预先设定的预警值，立即停止顶升，分析原因，采取措施解决。

（3）桥梁顶升前将悬挂于梁体的高压水管进行局部支撑托换，避免高压水管发生硬折角而损伤，或发生漏水事件。

（4）顶升施工时，进行交通管制，对桥面机动车辆进行限速管制，使车辆慢速通过桥面，减少动荷载对桥梁的冲击作用。

（5）实践表明：在满足不中断交通的情况下，采用分步顶升法有效解决了梁体顶升施工无限位措施的弊端，避免了梁体在顶升过程中成为漂浮体系的风险，并保证了支座更换施工的顺利完成。

参考文献：

[1] 曾榕彬.桥梁支座病害成因及防治措施[J].山东交通科技，2017(2).
[2] 韩振勇.同步顶升技术在旧桥改造工程中的应用[J].城市道桥与防洪，2006(5).
[3] 汤卫东.不中断交通中的旧桥支座更换施工[J].交通科技与经济，2007(4).
[4] 邱湧彬，刘世忠，李丽园.顶升技术在城市桥梁改造中的应用[J].施工技术，2013(5).
[5] 陈智强.厦门仙岳路改造工程既有桥梁顶升技术[J].公路，2012(9).
[6] 孙泽良.桥梁顶升更换支座施工技术探讨[J].交通运输研究，2012(19).
[7] 白凤明.桥梁同步顶升技术及其计算机仿真研究[D].湖北工业大学硕士学位论文，2013.
[8] 吴鸿庆.结构有限元分析[M].北京：中国铁道出版社，2000.
[9] 李廉锟.结构力学[M].5 版.北京：高等教育出版社，2010.
[10] 高冉，刘其伟.局部顶升在桥梁拼宽支座更换施工中的应用[J].现代交通技术，2012(1).