

应用轻型桥面吊机拆除连续刚构上部构造施工技术

任小恩

(广东冠粤路桥有限公司, 广东 广州, 511450)

摘要: 以马兰大桥老桥为工程背景, 针对旧桥拆除的施工过程, 给出一种利用移动式桥面吊机拆除施工中箱梁的新方法。在确定 T 构和主桥的拆除施工工艺及流程后, 通过数值计算测得 T 构拆除过程中桥墩应力理论值, 并将理论值与现场监测的实测进行对比。通过理论受力分析和实桥应力监测数据的详细对比, 验证了本项目研究提出的主桥拆除技术与理想设计情况一致, 所得施工技术方案具有良好的可行性与有效性。

关键词: T 型钢构; 桥梁拆除; 数值模型; 应力监测; 施工流程

中图分类号: U 455.6

文献标识码: A

Application of Light Bridge Deck Crane to Demolish the Upper Structure of Continuous Rigid Frame Construction Technology

REN Xiaoen

(Guangdong Guanyue Highway and Bridge Co., Ltd., Guangzhou 511450, Guangdong, China)

Abstract: Taking the old Malan Bridge as the engineering background, a new method of using a mobile bridge deck crane for the lifting of box beams during the demolition construction of old bridges was proposed. After the demolition construction process and process of the T-structure and main bridge were determined, the theoretical stress values of the bridge piers during the T-structure demolition process were measured through numerical calculations. The theoretical values were compared with on-site monitoring measurements. Finally, through theoretical stress analysis and detailed comparison of actual bridge stress monitoring data, it was verified that the main bridge demolition technology proposed in this research is consistent with the ideal design situation, and the obtained construction technology scheme has good feasibility and effectiveness.

Key words: T-shaped steel structure; bridge demolition; numerical model; stress monitoring; construction process

目前国内外拆除工程建筑物的方法主要有爆破法、机械法和综合拆除法。爆破法速度快、效果明显, 但需要一定的施爆条件和场地, 并且容易对环境产生污染, 很大程度上限制了其在工程上的应用; 机械法最大的缺点就是效率低; 综合拆除法对上述方法进行有机结合并优化。随着科技的发展, 能耗低、无噪声、体积小、操作灵活等特点的工具大量出现。杭州市京杭运河北星桥、广州市镇安立交原高架桥、深圳市深南大道侨城东立交桥等都先后采用了新型机具进行拆除, 大大节约了施工工期和成本。目前, 国内外

对桥梁拆除方法已进行了许多有益的探索实践, 但对于旧桥的拆除方法尚未形成完整的系统。旧桥拆除是桥梁建设顺序的逆向实施, 存在诸多非常规的工程操作过程, 其实施过程具有风险高、技术复杂、实施难度大、涉及方面繁多的特点。因此, 如果拆除方案的选择论证不够充分、设计不够深入细致, 拆除的难度及风险都会非常大。本文以马兰大桥老桥为工程背景, 针对旧桥拆除的施工过程, 研究移动式桥面吊机在拆除施工中的应用, 确定 T 构和主桥的拆除施工工艺及流程, 最终通过理论受力分析和实桥应力监测数据

收稿日期: 2023-10-24

作者简介: 任小恩, 工程师, 本科, 研究方向为施工管理

的详细对比，验证了本项目研究提出的主桥拆除技术与理想设计情况一致，所得施工技术方案具有良好的可行性与有效性。

1 工程概况

京杭运河枣庄段二级航道整治工程，整治段自韩庄船闸起，至马兰大桥下游止。马兰大桥老桥由于病害较严重，箱梁大部分部位裂缝较多，支座受损严重，护栏桥面开裂，给行人行车造成较大的安全隐患，需拆除并原位重建。马兰大桥老桥全长 735 m，共 24 跨，主跨为 80 m 带 T 梁挂孔的预应力砼连续梁，引桥为 25 m 跨径的预应力 T 梁，桥梁全宽 11 m。基础为桩基础，主桥下部结构为空心薄壁墩，引桥下部结构为圆柱墩。T 构为单箱双室预应力砼箱梁，墩顶梁高 4.95 m，挂梁端梁高 1.8 m，共分 0#~11#梁块浇筑。引桥上部结构为 25 m 预应力 T 梁，每跨布置 5 片梁，单片中梁重 44.9 t，单片边梁重 46.7 t。

2 主桥拆除技术方案

马兰大桥老桥（见图 1）主桥横跨京杭运河，主桥结构为 3 跨带挂梁的 T 型刚构，跨径组合为（52.5+80+52.5）m，中跨和边跨合龙段为 25 m T 型挂梁，主墩箱梁结构为单箱双室悬臂结构，因此拆除过程应尽量保证结构的对称稳定，不能对桥梁产生过大的振动、冲击等。总体拆除思路为：先拆除 T 型挂梁，然后采用静力切割的方法对称拆除箱梁节段，拆除时保持两个悬臂节段施工的平衡，不平衡重不得大于 1 个节段重量，最后拆除 0#块及桥墩、承台。

水中挂梁拆除采用切割解体后浮吊进行吊装拆除，岸上挂梁采用切割后汽车吊进行吊装拆除，悬臂箱梁拆除采用吊具线切法，即用吊具等起吊设备提吊住切割节段，然后切割箱梁截面并采用浮吊吊装转运。0#块及桥墩、承台切割后采用浮吊吊离运至岸边临时码头进行破碎。



图 1 马兰大桥老桥

3.1 T 构主桥拆除技术

拟采用无支架法施工，即采用桥面吊机进行吊装下悬臂箱梁节段拆除施工。根据施工要求，首先利用浮吊对水中 1 跨挂梁及利用汽车吊对岸上 2 跨挂梁进行拆除，之后采用桥面吊机拆除悬臂箱梁，总共采用 8 套桥面吊机进行拆除作业。主桥悬臂 T 构拆除作业时，因共配套 8 套桥面吊机，可同时进行 2 个 T 构的拆除作业。T 构箱梁拆除方案概述：

- （1）根据 T 构箱梁切割长度，切割长度基本与老桥建造时分块一致，错开原节段锚固头位置，同时制作专门吊具用于吊装，并设置防冲挑梁。
- （2）T 构箱梁拆除时，采用专门吊具吊装，起重索应施加预紧力，预紧力大小视节段重量而定，预紧力大小可通过观察切割槽口的变化控制，使预紧力大小与节段重量一致。
- （3）以上拆除过程应遵循对称、平衡的原则，T 构两侧已拆除梁段数相差不能超过 1 个梁段。

（4）切割好的梁段利用桥面吊机下放至河面 200 T 平板船上运至转运区，破碎后外运至弃渣场。

3.2 桥面吊机系统

本桥拆除施工中箱梁的吊装使用移动式桥面吊机。桥面吊机设计起重量为 35 t，吊机结构为钢桁架结构，起重设备为 10 t 卷扬机和滑车组。桥面吊机如图 2 所示，主要材料特性、尺寸及性能参数分别见表 1、表 2。

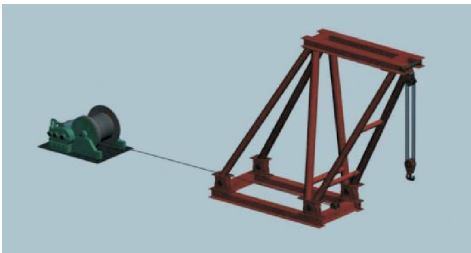


图 2 桥面吊机示意图

表 1 吊机主要材料特性表

构件材料		弹性模量 E/Pa	泊松比 μ	密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	容许应力 σ/MPa
I28 工字钢		2.1×10^{11}	0.3	7850	160
型钢 (Q235)	25 槽钢				
	16 槽钢				
	10 槽钢				
钢管	$\varnothing 219 \times 10$				
	$\varnothing 273 \times 12$				

表2 吊机主要尺寸及性能参数表			
参数	数值	参数	数值
吊重不平衡系数	1.1	底座长/mm	6103
超载系数	1.1	整机宽/mm	2750
动载系数	1.25	纵梁长（悬挑）/mm	3626
吊机设计额定起重量/t	35	吊机整体高/mm	5000
整机最大应力/MPa	105.2	整机最大变形/mm	2.7

- (1) 桥面吊机安装与拆除。桥面吊机安装利用 16 t 汽车吊配合在桥面拼装，吊机安装过程示意如图 3 所示。卷扬机安装在 0#块上，单个 0#块安装 4 台。桥面吊机拆除利用浮吊在桥下与安装步骤逆向进行拆除。
- (2) 桥面吊机行走。桥面吊机行走前先将卷

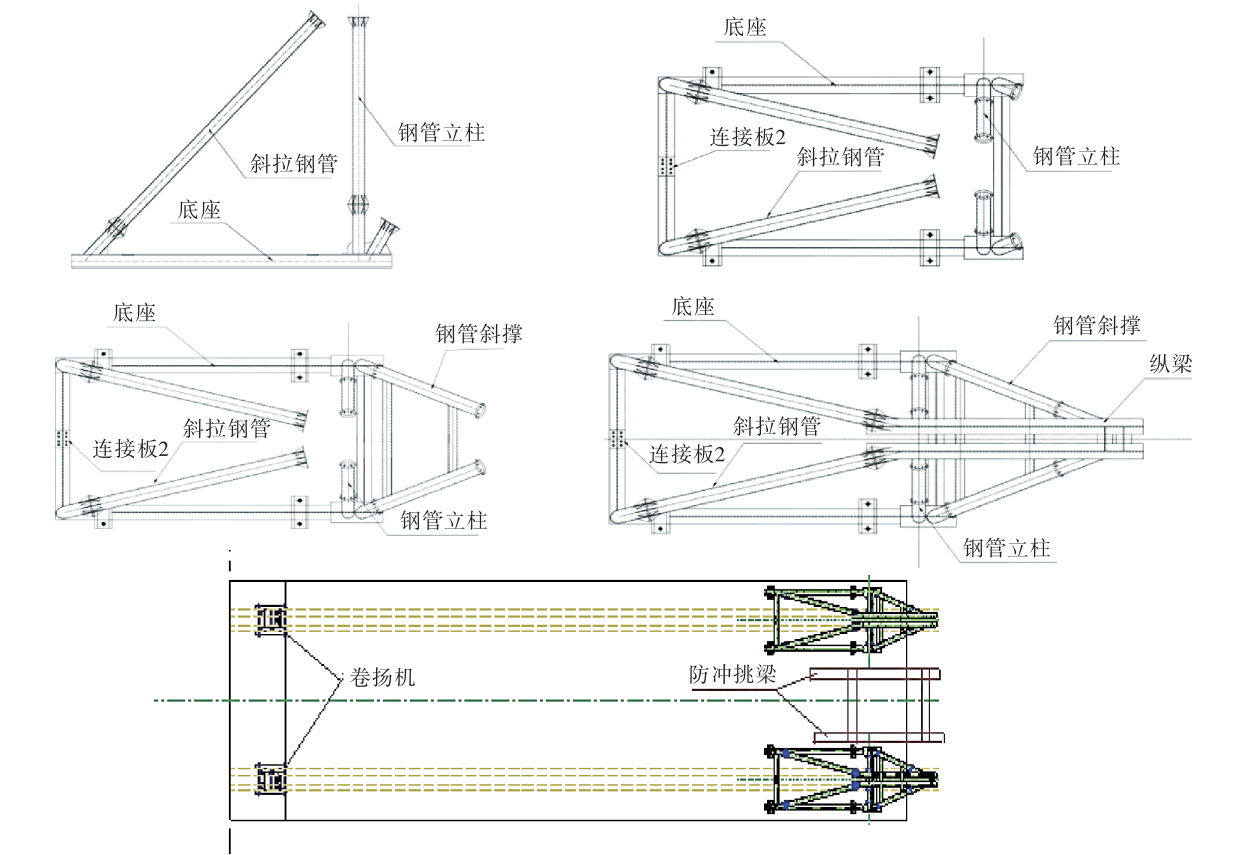


图3 桥面吊机安装图

扬机滑车组提升至最高位置，然后拆掉前锚点，再拆掉后锚点，拆除锚栓时先用千斤顶拉松螺帽。行走时用 2 个 5 t 手拉葫芦对称地拉住底座的两根纵梁，同步收紧葫芦，使桥面吊机滑至指定位置，最后用葫芦将吊机位置调正。

(3) 桥面吊机使用。桥面吊机使用前应对各部件进行检查，确保正常方可使用。切割前，带紧卷扬机钢丝绳，切割过程中，根据箱梁节段重量调整卷扬机提升力，使被切割节段与桥梁整体稳定分离无冲击，节段切断分离后，用桥面吊机提升梁段，使挑梁与被切割段松开，两台桥面吊机同步下放梁段至运输船。

3.3 主桥拆除施工流程

预应力混凝土 T 型刚构桥总体拆除顺序为：①拆除桥面附属设施；②拆除 T 型挂梁；③拆除 T 构箱梁；④拆除 0#块及桥墩、桩基。

3.4 旧桥拆除模拟计算分析及应力监测

3.4.1 Midas Civil 建模

(1) 理论模型。采用有限元软件 Midas Civil 对马兰大桥老桥拆除进行数值模拟计算。采用箱室的中线作为主梁来建立模型，T 型挂梁采用梁格模型进行模拟，每片 T 梁之间通过横隔梁和虚拟横梁作为挂梁的横向联系，横梁的模拟采用梁单元。有限元模型如图 4 所示。

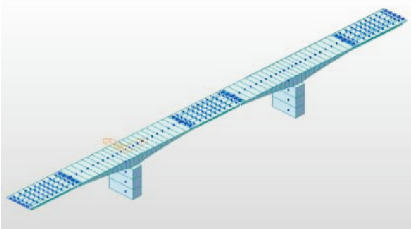


图4 Midas Civil 整体模型立面图

(2) 材料。计算模型中取材料和热特性参数如表 3 所示。

表 3 混凝土材料特性值

混凝土材料特性	数值
弹性模量/MPa	3.25×10^4
混凝土线膨胀系数/(1/℃)	1.0×10^{-5}
混凝土容重/(kN/m ³)	25
泊松比	0.2
T 构箱梁混凝土强度/MPa	15.4

表 3 中：容重取配合比实际容重；每立方米混凝土水泥用量为配合比数据换算所得；强度发展系数为程序参照美国混凝土协会（ACI）标准提供的参考值；其它数据均为相关规范或手册提供的参考值。

(3) 计算的作用参数选取。桥梁拆除过程中考虑自重、二期恒载以及桥梁拆除过程中吊机对桥梁作用的等效荷载，由于旧桥已建成运营多年，因此在 Midas Civil 中未考虑结构收缩徐变。其中二期恒载包括桥面铺装荷载（主梁 -24.15 kN/m，

挂梁 -4.8 kN/m）和防撞护栏荷载（偏心荷载：-12.5 kN/m），防撞护栏独立拆除，T 构翼缘板在防撞护栏拆除时也随之拆除，其中单侧翼缘板拆除宽度 1 m，翼缘板面积为 0.16 m³，拆除翼缘板的重心距离 T 构梁中心线 4.84 m，换算成等效荷载反向作用在 T 构上模拟 T 构翼缘板的拆除，两侧翼缘板拆除换算成等效荷载值为 9.88 kN·m，二期铺装荷载则随着 T 型挂梁和 T 构箱梁同拆除。

3.4.2 马兰大桥老桥旧桥拆除理论测量值

(1) T 型挂梁拆除。T 梁拆除过程主要对 T 构梁端挠度进行分析（见表 4、表 5），当前步骤挠度值为当前工况下结构挠度变化值，挠度累计值防撞护栏及翼缘板拆除前的挠度值为基准，累计各个拆除施工步骤当前挠度值。

(2) T 构箱梁拆除。T 构箱梁的拆除主要对控制截面应力测量点的应力进行分析，根据 Midas Civil 有限元模型进行分析，各 T 构梁块拆除过程中，应力测量点理论应力值如表 6 所示，

表 4 T 构梁端当前步骤挠度表

单位：mm

位置（步骤）		1#墩小里程	1#墩大里程	0#墩小里程	0#墩大里程	0#墩小里程	0#墩大里程
拆除防撞护栏及翼缘板		9.425	6.382	7.647	7.647	6.384	9.425
浮吊拆除 0-0#跨	吊拆 1 号梁	0.123	-0.173	0.112	0.961	3.021	4.502
	吊拆 2 号梁	0.293	-0.412	0.371	0.207	2.240	4.572
	吊拆 3 号梁	0.667	-0.938	0.889	-0.887	0.772	5.617
	吊拆 4 号梁	0.633	-0.890	0.842	-0.777	0.918	5.520
	吊拆 5 号梁	-0.185	0.260	-0.578	3.917	2.239	4.712
汽车吊拆除 0-1#挂梁	吊拆 1 号梁	0.305	0.811	3.323	2.819		
	吊拆 2 号梁	0.591	0.185	2.697	3.105		
	吊拆 3 号梁	1.261	-0.762	1.751	3.775		
	吊拆 4 号梁	1.200	-0.664	1.850	3.714		
	吊拆 5 号梁	-1.100	4.472	4.472	-1.100		
汽车吊拆除 0'-1#挂梁	吊拆 1 号梁	4.218	2.181				
	吊拆 2 号梁	3.789	2.326				
	吊拆 3 号梁	3.790	2.326				
	吊拆 4 号梁	3.788	2.326				
	吊拆 5 号梁	5.551	-1.863				

表 5 T 构梁端当前步骤累计挠度表

单位：mm

位置（步骤）		1#墩小里程	1#墩大里程	0#墩小里程	0#墩大里程	0#墩小里程	0#墩大里程
拆除防撞护栏及翼缘板		9.425	6.382	7.647	7.647	6.384	9.425
浮吊拆除 0-0#跨	吊拆 1 号梁	9.548	6.209	7.759	8.608	9.405	13.927
	吊拆 2 号梁	9.841	5.797	8.13	8.815	11.645	18.499
	吊拆 3 号梁	10.508	4.859	9.019	7.928	12.417	24.116
	吊拆 4 号梁	11.141	3.969	9.861	7.151	13.335	29.636
	吊拆 5 号梁	10.956	4.229	9.283	11.068	15.574	34.348

续表

位置（步骤）	1#墩小里程	1#墩大里程	0#墩小里程	0#墩大里程	0#墩小里程	0#墩大里程
汽车吊拆除0-1#挂梁	吊拆1号梁	11.261	5.04	12.606	13.887	
	吊拆2号梁	11.852	5.225	15.303	16.992	
	吊拆3号梁	13.113	4.463	17.054	20.767	
	吊拆4号梁	14.313	3.799	18.904	24.481	
	吊拆5号梁	13.213	8.271	23.376	23.381	
汽车吊拆除0'-1#挂梁	吊拆1号梁	17.431	10.452			
	吊拆2号梁	21.22	12.778			
	吊拆3号梁	25.01	15.104			
	吊拆4号梁	28.798	17.43			
	吊拆5号梁	34.349	15.567			

即以 T 梁拆除完成后的桥墩应力为基准，各拆除工况相对于基准应力的改变量。

表 6 T 构箱梁拆除各测点应力理论值

单位：MPa

工况（步骤）	CD1 ~ CD6	CD7 ~ CD12
拆 11#块	0.041	0.042
拆 10#块	0.08	0.08
拆 9#块	0.125	0.125
拆 8#块左侧	-0.334	0.621
拆 8#块右侧	0.172	0.172
拆 7#块左侧	-0.229	0.622
拆 7#块右侧	0.221	0.221
拆 6#块	0.265	0.265
拆 5#块右侧	0.568	0.008
拆 5#块左侧	0.311	0.311
拆 4#块右侧	0.568	0.102
拆 4#块左侧	0.359	0.359
拆 3#块	0.409	0.409
拆 2#块右侧	0.541	0.32
拆 2#块左侧	0.452	0.453
拆 1#块	0.496	0.496

3.4.3 控制截面及测点布置

（1）控制截面及测点布置。马兰大桥老桥在 T 构拆除过程中，应变测量采用进口振弦式应变传感器和配套读数仪。振弦式应变传感器的精度高（达 0.1 $\mu\epsilon$ ）、受环境影响小、粘结性能要求不高、没有零漂，克服了一般应变传感器稳定性差的缺点，进口传感器和读数仪可靠度高，同一批传感器标定系数稳定可靠，从而减少了测试系统的误差，保证实验数据的精确性。量测内容：T 构在各拆除工况下的应变。

应力测量主要是在 T 构拆除过程中对桥墩应力进行测量，应力监测点布置见图 5。由于 T 构梁块存在不对称拆除，因此将控制截面布置在墩底部位，为防止应力测点布置过低而受局部影响

大，测点的具体位置布置如下：CD1 ~ CD6 为大里程侧（有限元模型右侧）测点，距离 0#块底部 11.25 m；CD7 ~ CD12 为小里程侧（有限元模型左侧）测点，距离 0#块底部 9 m。

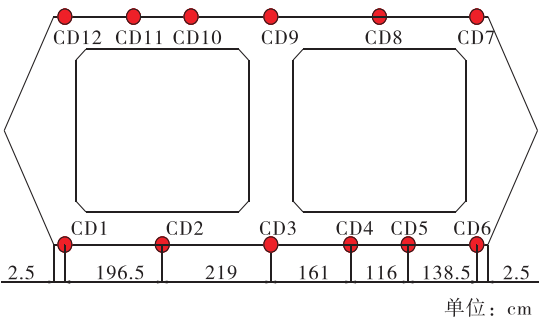


图 5 应力监测点布置图

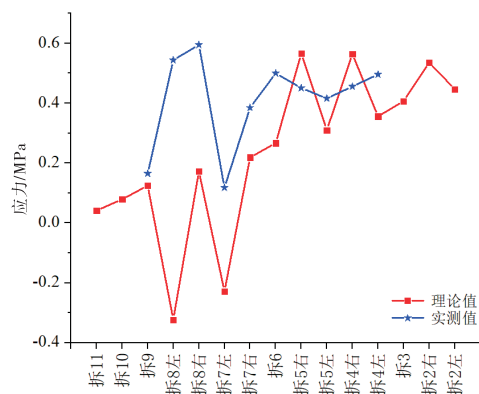
3.4.4 实际测量数据

T 构拆除过程中，每一工况完成时，对各测点进行测量。为保证 T 构在各工况作用下变形基本稳定，每一工况完成后，至少需等待 10 min 才能进行测量，以确保测量数据的稳定性，各工况实际测量数据与理论值对比情况如图 6 所示。

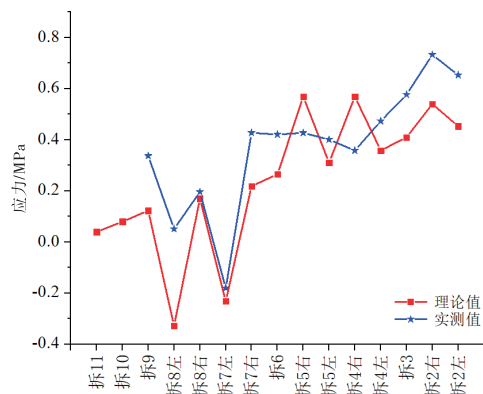
测点 1 在 11#块及 4#块拆除后测量发现其已经脱落，因此未取得测点 1 拆除 11#块、3#块、2#块的数据。拆除 10#块时由于没有及时进行测量而未取得其拆除数据。布置在测点 7 与测点 8 的 1 个振弦式应变传感器在测量中被损坏，剩余 1 个测量数据不能反映桥梁实际拆除工作。

（1）测点 1 数据对比：就数据变化趋势而言，在拆除 8#块左侧与拆除 5#块右侧数据与理论数据变化趋势不一致；就数值差值而言，拆除 8#块左侧与拆除 8#块右侧数据与理论数据差距较大，其他数据模拟良好。

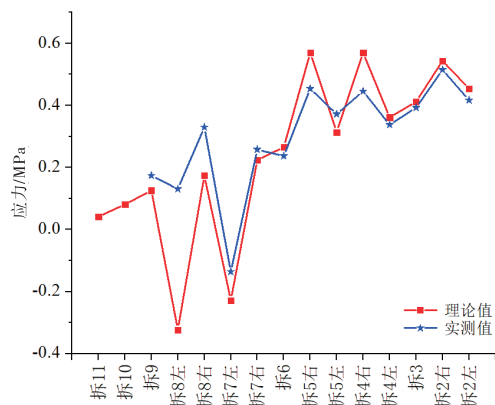
（2）测点 2 数据对比：就变化趋势而言，实测数据变化趋势与理论数据变化趋势一致；从数值差值而言，拆除 8#块左侧实测数据与理论数据



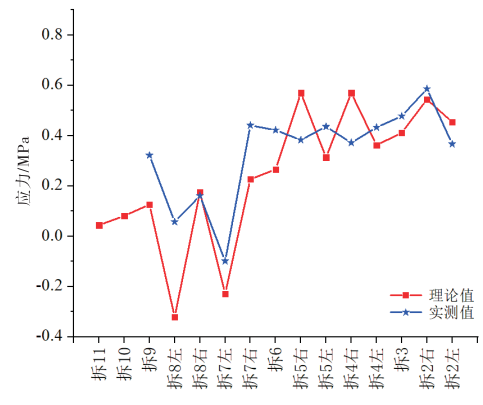
(a) CD1 理论值与实测值数据对比



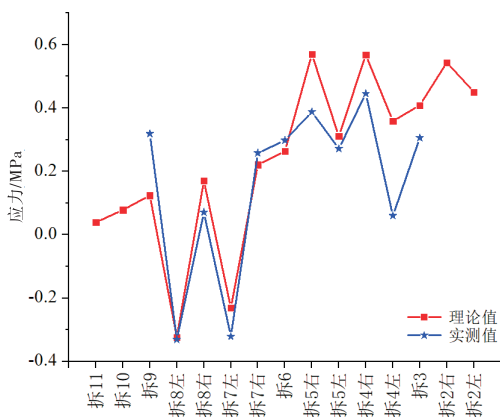
(e) CD5 理论值与实测值数据对比



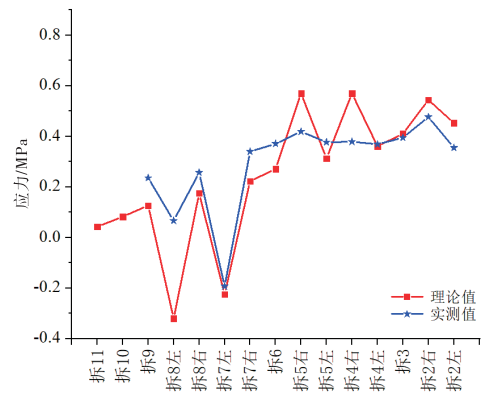
(b) CD2 理论值与实测值数据对比



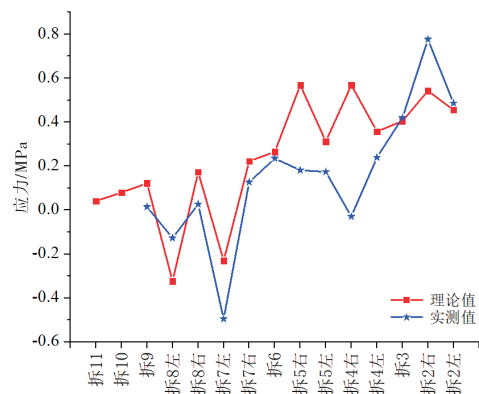
(f) CD6 理论值与实测值数据对比



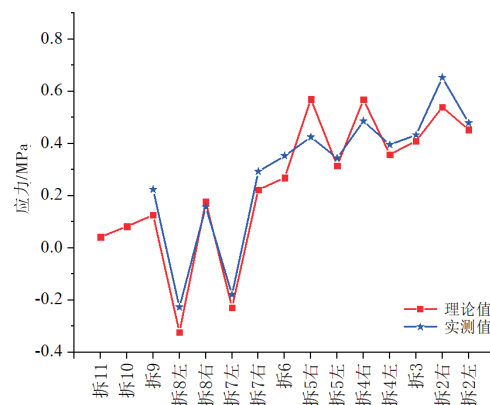
(c) CD3 理论值与实测值数据对比



(g) CD1 ~ CD6 理论值与实测平均值对比

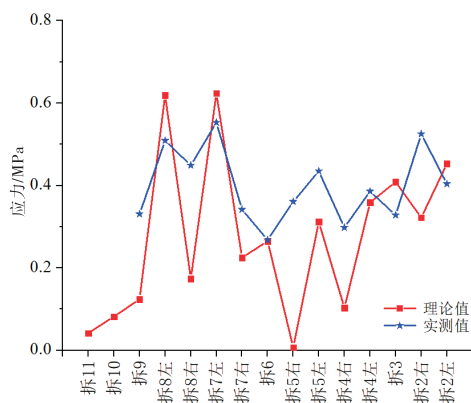


(d) CD4 理论值与实测值数据对比

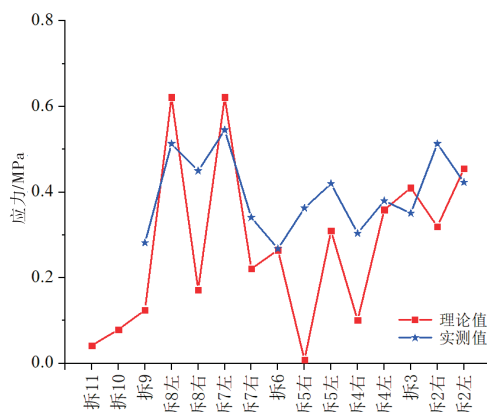


(h) CD1 ~ CD6 剔除差值后理论值与实测平均值对比

图6 理论值与实测值对比

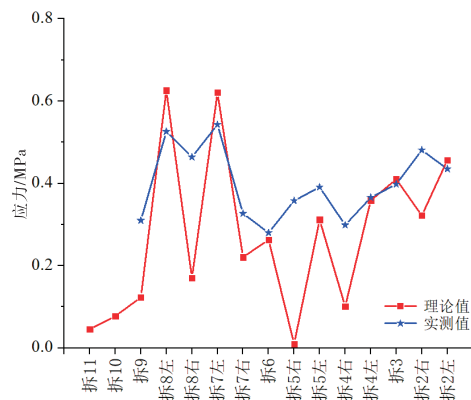


(i) CD9 理论值与实测值数据对比

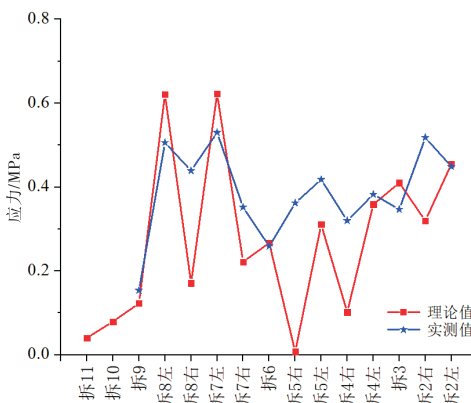


(m) CD9 ~ CD12 理论值与实测平均值数据对比

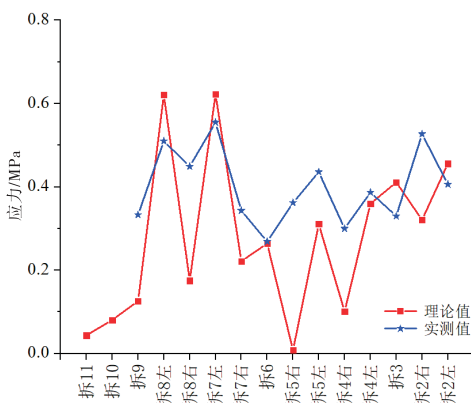
图6 理论值与实测值对比 (续图)



(j) CD10 理论值与实测值数据对比



(k) CD11 理论值与实测值数据对比



(l) CD12 理论值与实测值数据对比

相差较大,其他数据模拟良好。

(3) 测点3 数据对比: 实测数据变化趋势与理论数据一致,其中拆除4#块左侧实测数据与理论数据在数值上相差较大,其他数据模拟良好。

(4) 测点4 数据对比: 就数据变化趋势而言,拆除5#块右侧与拆除4#块右侧实测数据与理论数据变化趋势不一致,且其数据差值较大,其他数据模拟良好。

(5) 测点5 数据对比: 就数据变化趋势而言,拆除4#块右侧数据变化与理论数据变化趋势不一致;就数值差值而言,拆除8#块左侧与理论数据相差较大,其他数据模拟良好。

(6) 测点6 数据对比: 就数据变化趋势而言,拆除6#块、5#块右侧以及4#块右侧数据变化趋势与理论数据变化趋势不一致;从数值差值来看,拆除8#块左侧与拆除7#块右侧数值与理论数值相差较大,其他数值模拟良好。

(7) 对测点1~6 数据取平均值与理论数据进行对比: 从变化趋势来看,理论数据与实测数据变化趋势基本一致;从数值差值来看,拆除8#左侧与拆除4#右侧实测数据与理论数据相差较大,其他数值模拟良好。

(8) 将数据变化趋势不一致,以及数值差值较大的实测数据全部剔除后,可以看出实测数据与理论数据基本一致,有限元模型能较好的模拟桥梁实际拆除工作。

(9) 测点9、测点10、测点11、测点12 实际测量数据在变化趋势和数值上都较为接近,理论模型中测点7~12 理论数据也相同,因此将其一同进行对比。从变化趋势来看,拆除6#块、拆除5#块右侧、拆除3#块以及拆除2#块右侧的实测数据与理论数据不一致;从数值差值来看,拆除8#块右侧、5#块右侧数值差值较大,其他数值

模拟良好。在拆除8#块右侧和拆除5#块右侧时各测点实际测量数据与理论数据相差较大,其余工况理论模拟结果与测试数据吻合良好。

4. 结语

本文以马兰大桥老桥为工程背景,针对该桥拆除施工中箱梁的吊装中使用的一种新型移动式桥面吊机,给出了T构和主桥的拆除施工工艺及流程,最后通过数值计算测得T构拆除过程中桥墩应力理论值,并通过理论值与现场监测的实测数据进行对比,验证了本项目研究提出的主桥拆除技术与理想设计情况一致,所得施工方案具有良好的可行性与有效性。

参考文献:

[1] 凌宇恒. 高速公路跨线天桥爆破拆除及数值模拟[D].

南宁:广西大学,2018.

[2] 张帆. 连续刚构钢筋混凝土箱梁拆除技术研究[D]. 郑州:郑州大学,2015.

[3] 潘久贵,颜全胜,邓洪钧. 龙桥东江大桥T构拆除施工技术[J]. 科技通报,2021,37(10):71-77.

[4] 全瑞金,李博. 跨东江航道旧桥拆除施工方案[J]. 广东公路交通,2017,1(5):30-34.

[5] 邢健. 惠州市龙桥东江大桥旧桥改造方案比选[J]. 交通世界,2021,4(2):161-162.

[6] 凌庆基. 观澜大桥旧桥拆除方案的比选与施工[J]. 广东公路交通,2008(1):45-47.

[7] 张治成,胡开建,李强,等. 旧桥拆除中的预应力筋放张效果探讨[J]. 华东公路,2012(3):68-71.

[8] 孔繁龙. 施桥运河大桥旧桥拆除施工技术[J]. 华东公路,2013(1):16-19.

[9] 叶显亮. 预应力混凝土T型刚构桥旧桥拆除分析[J]. 山西建筑,2016,42(022):157-158.

(上接第9页)

利用 $l_k = 365.61\text{ m}$ 反算 $K = 63.66 > 0$,表明板条在高水位下受到的浮托外力远大于板条自身重力的法向分量。

同时也可计算出,当板块仅在自身重力作用

下发生滑移弯曲所需的极限长度为 $l_k' = \sqrt[3]{\frac{8\pi^2 EI}{P_{1x}}} = 769.86\text{ m}$,进一步说明水的浮托力在整个滑移弯曲破坏过程中起到决定性的作用。

5 结论

(1) 本研究采用岩体弹性变形本构方程,对红层滑移弯曲破坏机理进行分析,推导出红层边坡发生滑移弯曲的极限承载力、极限坡长和弯曲点位置计算式;并进一步分析推导,得出红层软岩发生滑移弯曲的判据。

(2) 利用湖南湘西某大型缓倾顺层滑坡实例对上述结论进行验证,分别计算出了坡体在自重作用下、自重和地下水浮托力共同作用下发生滑移弯曲的极限坡长。

(3) 通过对弯曲破坏的机理分析及验证情况总结,得出红层顺层边坡发生滑移弯曲破坏时,其岩层地下水的浮托力起到了关键性作用,是边坡发生弯曲破坏的重要诱因之一。

参考文献:

[1] 湖南省地产矿产局. 湖南省区域地质志[M]. 北京:地质出版社,1988:256-257.

[2] 左文贵. 湖南白垩系、第三系红层工程特性研究[D]. 长沙:中南大学,2006.

[3] 蒋正,倪化勇,宋志. 重庆丰都县城区红层边坡变形破坏模式与稳定性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报,2018,29(6):56-60.

[4] 张劲松,杨红,刘云海. 滇西红层边坡变形破坏机制及整治对策研究[J]. 人民长江,2021,52(S1):69-73.

[5] 雷航,刘天翔,程强. 红层地区公路高边坡变形机理及支护措施研究[J]. 公路,2019,64(12):47-53.

[6] 田冉,张军,叶咸. 滇东北某运营期高速公路边坡失稳特征与成因分析[J]. 土工基础,2022,36(2):83-87.

[7] 姜思源,向喜琼. 层厚对红层边坡变形破坏影响研究[J]. 中国水运(下半月),2021,21(3):124-125.

[8] 李红英,濮仕坤,谭跃虎. 滑坡体稳定性分析方法比较[J]. 岩土工程技术,2022,36(3):208-213.

[9] 李安洪,周德培,冯君. 顺层岩质路堑边坡破坏模式及设计对策[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(S1):2915-2921.

[10] 汤明高,马旭,张婷婷. 顺层斜坡溃屈机制与早期识别研究[J]. 工程地质学报,2016,24(3):442-450.

[11] 王瑞春,王雪彤. 复杂条件下路堑边坡失稳变形机制分析和治理设计[J]. 岩土工程技术,2022,36(6):469-476.

[12] 童欣,方燃,李虹. 降雨对滑坡的稳定性影响及排水措施建议[J]. 岩土工程技术,2021,35(1):52-55,59.

[13] 周英博,柴少波,周秋鹏,等. 干-湿分明条件下降雨诱发滑坡演化过程模拟[J]. 岩土工程技术,2022,36(4):278-283.

[14] 朱木青. 顺层岩质边坡结构失稳弹性板理论法分析与实例[J]. 铁道科学与工程学报,2011,8(4):61-63.

[15] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京:科学出版社,1988.