

# 盾构施工临时栈桥安全监测技术

薛武强<sup>1</sup>, 盛健超<sup>2</sup>, 王哲<sup>2</sup>, 许四法<sup>2</sup>, 王瑞<sup>1,2</sup>

(1. 腾达建设集团股份有限公司, 上海 200120; 2. 浙江工业大学, 浙江 杭州 310000)

**摘要:** 为保证运输与吊装盾构机、车辆过程中临时栈桥的安全, 通过有限元软件分析临时栈桥混凝土盖板、纵横梁、钢立柱在车辆运输荷载下所受应力, 同时栈桥关键位置布置应变计进行现场实时监测。监测与数值模拟结果表明两者结果相接近, 最大应力值均在车辆满载时的薄弱结构处, 且均小于最大应力允许值, 满足设计与施工要求。临时栈桥现场安全监测及模拟计算方法具有一定可靠度, 可为同类工程提供借鉴。

**关键词:** 临时栈桥; 盾构机荷载; 有限元; 实时监测

中图分类号: TU712

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2020)06-0483-09

## Safety monitoring technology of temporary trestle bridge in shield construction

XUE Wu-qiang<sup>1</sup>, SHENG Jian-chao<sup>2</sup>, WANG Zhe<sup>2</sup>, XU Si-fa<sup>2</sup>, WANG Rui<sup>1,2</sup>

(1. Tengda Construction Group Co., Ltd., Shanghai 200120, China; 2. Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310000, China)

**Abstract:** In order to ensure the safety of the temporary trestle during transportation and hoisting of shield machines and vehicles, numerical calculations are performed on the temporary trestle's concrete cover, vertical and horizontal beams, and steel columns under vehicle transportation loads through finite element software. Strain gauges are arranged in key positions of the trestle for real-time on-site monitoring. The results show that the maximum stress values are all at the weak structure when the vehicle is fully loaded, and the monitored stress values are close to the numerical calculation results. The monitoring and numerical simulation results meet the maximum allowable stress value and meet the design and construction requirements. The on-site safety monitoring and simulation calculation methods of temporary trestle bridge have a certain degree of reliability, which can provide reference for similar projects.

**Key words:** temporary trestle bridge; shield machine load; finite element; real-time monitoring

## 0 引言

临时施工栈桥作为工程运输材料、设备、人员通行的临时桥梁设备, 其特点是承受能力大、施工快捷、拆除方便、可重复使用, 在我国的桥梁施工, 盾构隧道施工等得到大量应用<sup>[1-3]</sup>。为保证栈桥的安全, 较好的控制材料使用量, 对临时栈桥的设计进行计算分析就显得尤为重要<sup>[4]</sup>。李程远、肖长华等<sup>[5]</sup>结合袁河特大桥工程, 对临时栈桥的结构设计和验算进行了分析, 同时优化了施工方法, 为同类工程提供参考。田娥、杨正军等<sup>[6]</sup>通过有限元软件与现场监测数据对某大型临时栈桥稳定性进行研究分析, 证实了该大型栈桥的可靠性。通过众多学者<sup>[7-10]</sup>对临时栈桥的研究可知, 确保临时栈桥的稳

定和可靠是研究的重点。

本文结合实际工程, 通过有限元分析软件对临时栈桥纵横梁、盖板、柱的弯矩与剪应力进行分析, 针对现场栈桥的薄弱点布置测点, 采用现场实时监测的方法对组成的各个结构所受应力进行监测, 分析运输车辆在桥面不同位置产生的应力变化规律, 同时评价其质量性能, 明确桥梁的承载能力; 对比分析现场监测数据与有限元模拟得到的结果, 确保运输荷载过程中的施工安全可靠。

## 1 工程概况

本文以杭州地铁奥体中心站腾达 6-10 标段盾构接收套筒上方栈桥为研究对象, 由于栈桥在设计

搭建时并未考虑运输与吊装盾构机及车辆荷载所带来的影响,为保证运输过程中各方面的安全,需对栈桥进行实时监测。该栈桥直接承重接触面为奥体中心站 6-C 基坑主体围护结构路面的盖板体系,支承体系由临时搭建的钢立柱简支而成。盾构机经过吊装过程后采用特殊车辆运输,车体与盾构机总重达 205 t,需对运输路线所经的栈桥 50-51 轴路面盖板及临时钢立柱所受应力进行监测,截取其第一道支撑平面图如图 1 所示。

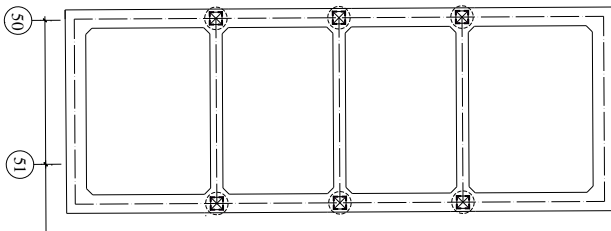


图 1 50-51 轴路第一道支撑平面图  
Fig. 1 First support plan of 50-51 axis road

结构路面盖板平面图与立面图如图 2 所示。计算节段总体长 24 m,宽 9 m,两端为地下连续墙,两侧为纵梁,纵梁下各设 3 根临时钢立柱,两侧纵梁之间采用横梁连接。

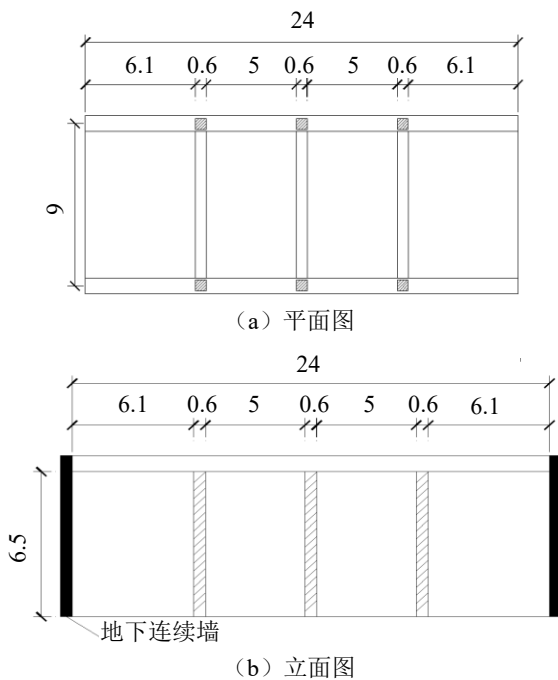


图 2 路面盖板平面图与立面图 (单位: m)  
Fig. 2 Pavement cover plan and elevation (Unit: m)

盾构机运输车辆由三轴牵引车与六轴半挂车组成,整车宽度 2.5 m。牵引车轴距为 3.175+1.4 m,六轴半挂车各轴轴距 1.86 m,牵引车第三轴距半挂车第一 5.5 m。牵引车与半挂车总重 20 t,运载盾构机时车货总重合计 150 t。运载盾构机时运输车辆通

过 50-51 轴路栈桥,计算时按车辆轴载作用在结构上。

## 2 结构计算

### 2.1 纵横梁与立柱计算

以特殊车辆可能产生的最不利情况对计算进行简化,利用 Midas 软件,采用移动荷载加载,计算纵梁受力包络图;并分别建立最不利工况下,横梁、钢立柱和混凝土板的计算模型如图 3 所示,计算各构件上最大荷载效应。

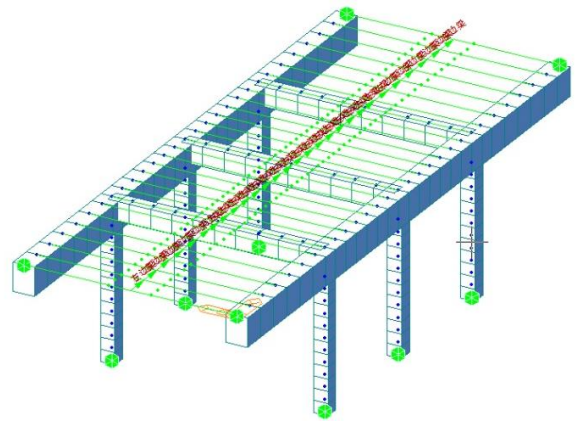


图 3 纵横梁立柱模型示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of column model of transverse beam

对于纵梁和钢立柱,在纵梁位置布置车道线,将特殊车辆的荷载采用自定义车辆荷载的形式通过移动荷载加载,此加载方法可以直接求得纵梁弯矩包络值。车道线设置为两个位置,分别按照中载和偏载加载。偏载时考虑车辆宽度与盾构机直径,最终确定车载加载中心线距离盖板轴线 2.4 m,车道加载位置如图 4 所示。设置自定义车辆需要知道车辆的轴载分布情况,本文计算仅以车辆后轴作用在结构上,根据车辆出厂信息后轴按前轴的 1.86 倍进行轴载分配,由此计算出的轴载分布如图 5 所示。前轴总荷载 525 kN,每轴分配荷载 175 kN;后轴总荷载 975 kN,每轴分配荷载 162.5 kN。

中横梁与边横梁的等效均布荷载计算简图以及横梁采用等效均布荷载加载示意图如图 6 所示。工况 1 下盖板所受等效荷载计算结果对应横梁见表 1。

#### (1) 纵梁弯矩、剪力计算结果

中载与偏载时,纵梁计算结果如图 7 所示。

由中载和偏载包络图可知,最大弯矩和最大剪力均发生在端部位置,其中偏载时的弯矩值较中载时大,说明不平衡力对栈桥影响较大。而中载剪力

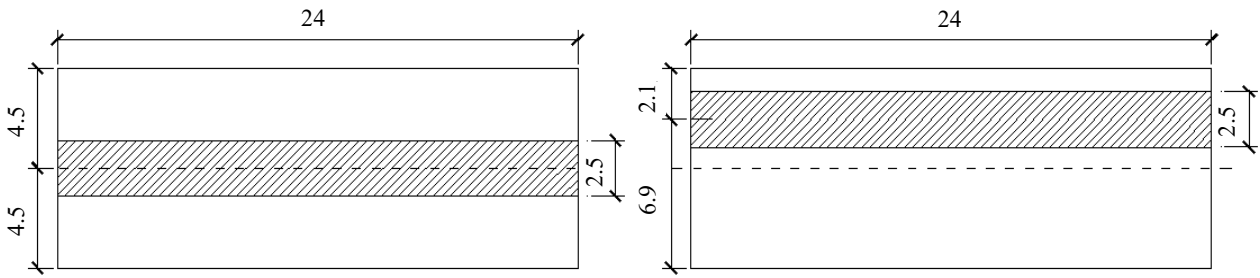


图 4 车道线布置位置图 (单位: m)

Fig. 4 Layout of lane line (Unit: m)

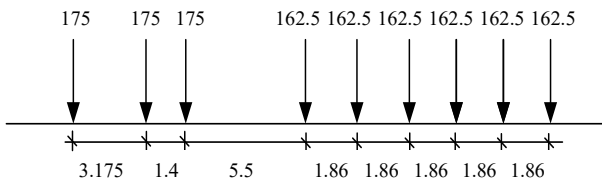


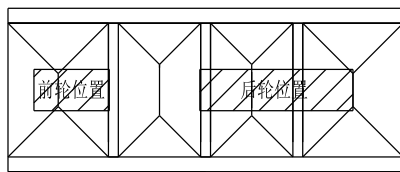
图 5 轴载分配示意图 (单位: kN)

Fig. 5 Schematic diagram of axle load distribution (Unit: kN)

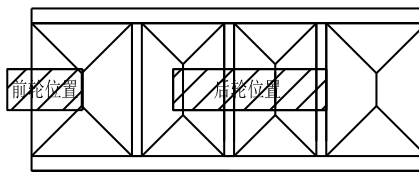
表 1 盖板等效荷载计算结果 (单位: kN/m)

Tab. 1 Calculation results of equivalent load of cover plate (Unit: kN/m)

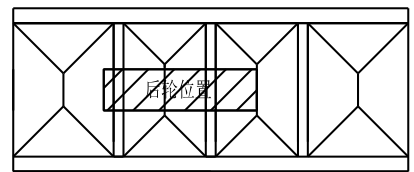
工况	横梁 1	横梁 2	横梁 3
工况 1	106.1	100	195.2
工况 2	18.8	177.9	98.5
工况 3	117.3	177.9	0



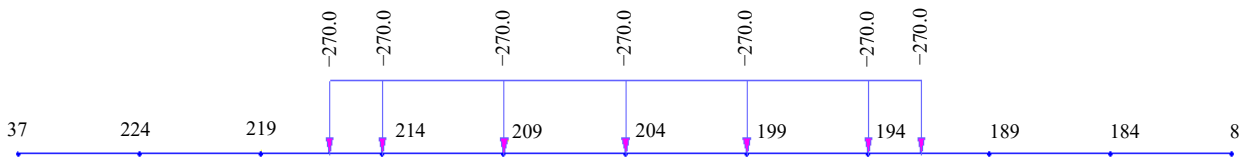
(a) 工况 1



(b) 工况 2



(c) 工况 3



(d) 等效均布荷载

图 6 横梁车辆均布荷载布置图与等效均布荷载最不利工况计算简图 (单位: kN/m)

Fig. 6 Layout drawing of cross-beam under uniformly distributed vehicle load and calculation diagram of the most unfavorable condition of equivalent uniform load (Unit: kN/m)

值与偏载剪力值差值控制在 5%以内, 则可说明车辆移动荷载对临时栈桥纵梁剪力影响不大。

(2) 横梁弯矩、剪力计算结果

通过图 8 可知, 对比两种荷载工况, 工况 1 对横梁最不利, 而在三根横梁中, 边梁是最危险位置, 应该对边梁采取加固措施。为此在进行现场实时监测测点布置时, 测点分布密度较高的一侧靠近危险的边梁一边。

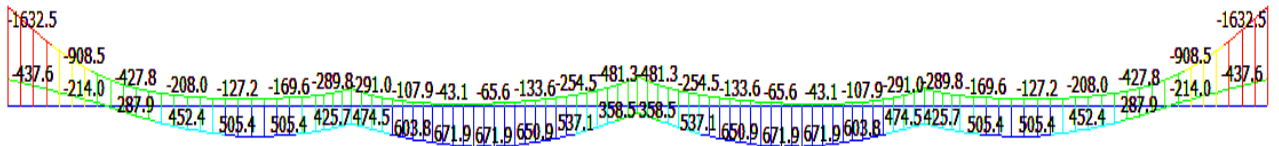
(3) 钢立柱轴力计算结果

钢立柱计算结果如图 9 所示。结构中各个立柱所受应力均满足规范承载力要求, 其中中柱所受轴力最大, 所以在进行现场实时监测的测点布置时, 轴力的测点布置于中柱两个相互垂直的方向。

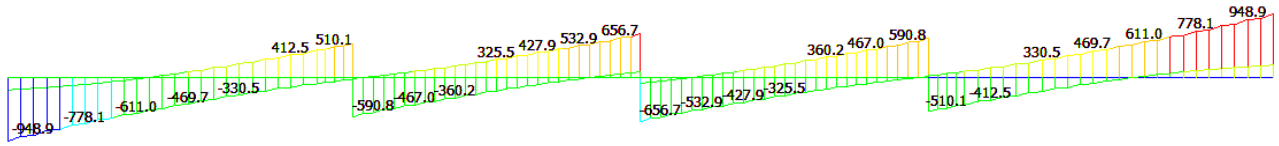
2.2 盖板计算

由于盾构机运输车辆限制, 车辆无法整车作用在结构上, 仅考虑后轴作用在结构上的情况。此时盖板宜按单块板进行验算, 只需要考虑盖板最大正弯矩。

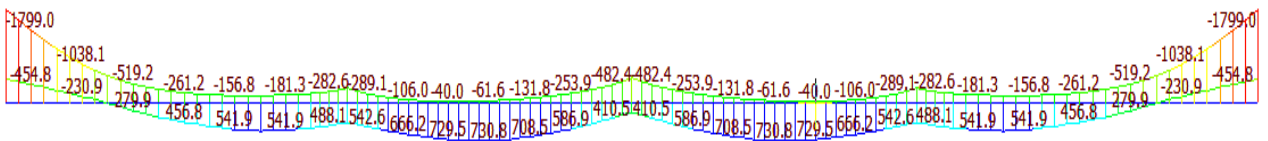
对于单块盖板的弯矩剪力计算, 边板相对于中板宽度更大, 短边受力更危险, 且中板上作用的车辆荷载较小。若边板强度满足要求则盖板验算通过。以边板为对象, 采用 ABAQUS 建立有限元模型计算, 如图 10 所示。截面弯矩通过网格单元积分获得, 通过自由体切片的形式提取, 板条验算截面示意图及由此得到的板条最大弯矩, 如图 11。



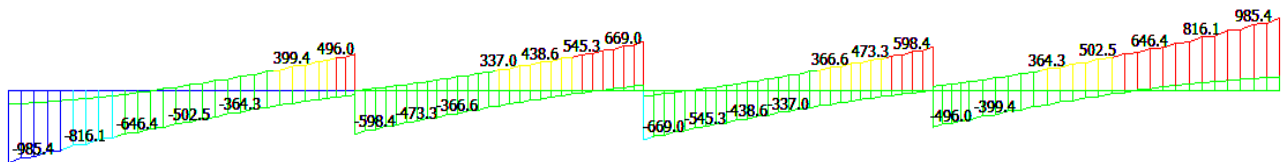
(a) 中载混凝土支撑弯矩包络线 (单位: kN·m)



(b) 中载混凝土支撑剪力包络线 (单位: kN)



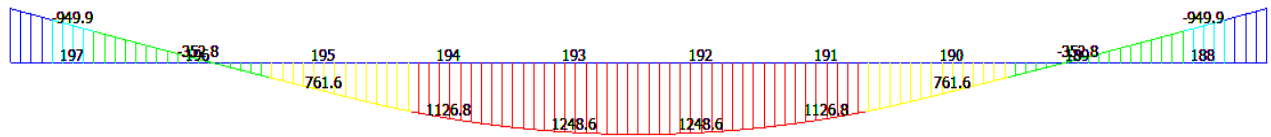
(c) 偏载混凝土支撑弯矩包络线 (单位: kN·m)



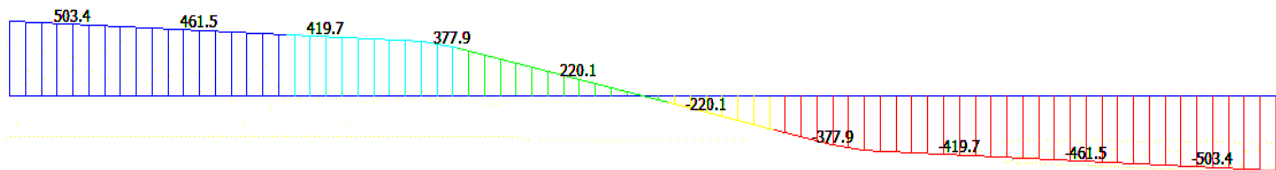
(d) 偏载混凝土支撑剪力包络线 (单位: kN)

图 7 纵梁在偏载与中载工况下弯矩、剪力计算结果

Fig. 7 Calculation results of bending moment and shear force of longitudinal beams under eccentric load and medium load



(a) 边梁弯矩图 (单位: kN·m)



(b) 边梁剪力图 (单位: kN)

图 8 边梁弯矩剪力图

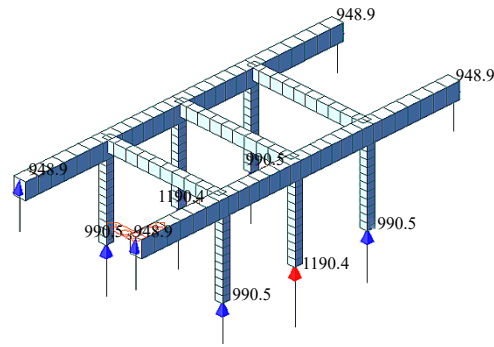
Fig. 8 Bending moment and shear diagram of side beam

由跨中板弯矩云图 11 可知, 最大弯矩发生在板中间两侧部分, 板中心位置弯矩较为稳定, 可知盖板中心位置受力均匀, 同时长边方向弯矩较短边方向大, 因此应对长边方向进行加固。

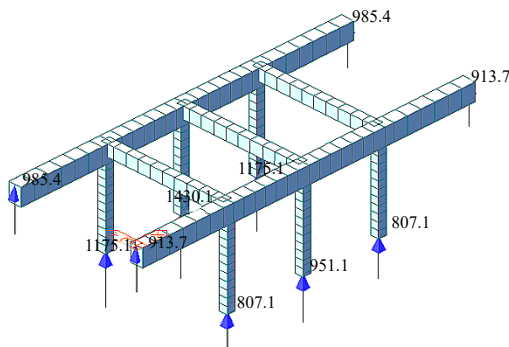
### 3 现场实时监测

基于上述数值模拟的结果主要针对栈桥盖板、

横梁、纵梁跨中控制截面薄弱点的弯曲拉应力进行监测, 用以评定盖板、横梁、纵梁的强度; 对栈桥钢立柱垂直平面的轴力进行监测, 用以评定钢立柱的强度。其中考虑到环境复杂以及个别应变计的稳定性比较差, B1-2 和 B5-6 相互作为备用测点, 具体测点布置如图 12 所示, 由于现场实际情况和实测数据表明 B3 应变计存在问题, 所以舍弃。



(a) 中载最大轴力



(b) 偏载最大轴力

图 9 钢立柱计算结果 (单位: kN)

Fig. 9 Calculation result of steel column (Unit: kN)

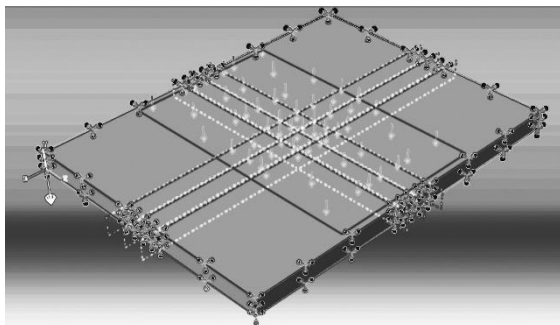


图 10 盖板有限元模型示意图

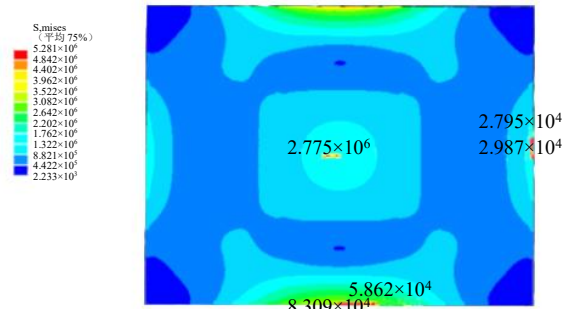
Fig. 10 Finite element model of cover plate

### 3.1 前盾加载监测

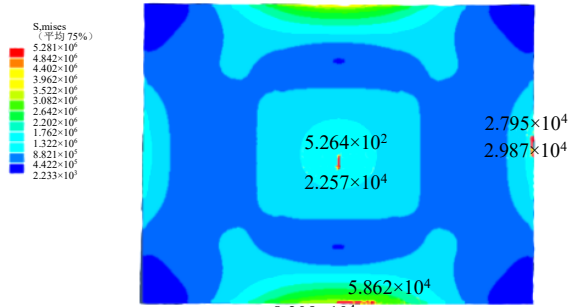
受现场运输条件复杂以及运输人员不可控等因素共同影响, 运输行驶路线以及运输车辆中途停靠点位较少或者没有, 不能较好反映出运输车辆在不同位置时栈桥结构所受应力的变化。运输车辆在不同点位时相对栈桥所在的位置、测量原始数据以及各个结构的应力变化图见图 13 和图 14。

(1) 运输车辆在栈桥上的相对位置如图 13 所示:

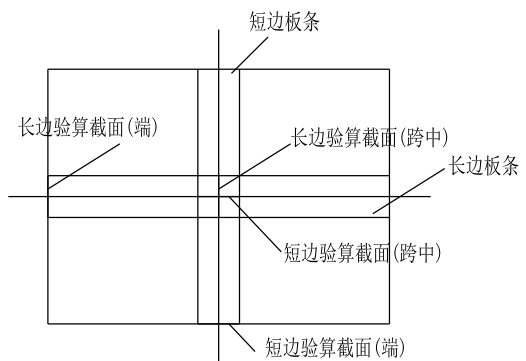
图 13 中工况 1 表示的是初始条件下栈桥空载所受应力情况; 工况 2 表示运输车辆空载时停于栈桥设定停靠点位时所受应力情况; 工况 3 表示荷载 (即盾构机前盾) 经过吊装后在运输车辆上完成加



(a) 短边最大弯矩



(b) 长边最大弯矩



(c) 板条验算截面示意图

图 11 跨中板条弯矩云图

Fig. 11 Bending moment cloud diagram of mid-span slats

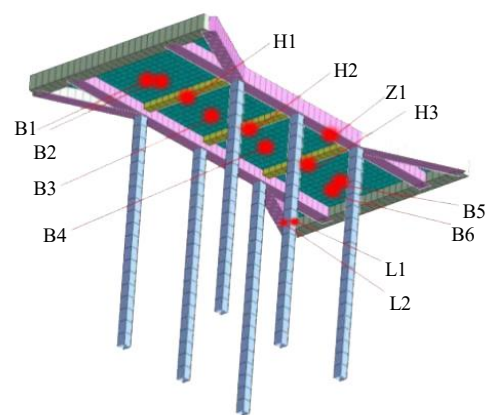


图 12 现场监测测点示意图

Fig. 12 Schematic diagram of on-site monitoring points

载所对应栈桥的受力情况; 工况 4 表示运输车辆满载后开始驶离栈桥并停靠在中途点位时所对应栈

桥的受力情况；工况5表示运输车辆与荷载完全驶离栈桥结构范围后所受应力状况。

(2) 前盾加载实测原始数据如表2所示。

(3) 处理后的前盾加载实测变化曲线图如图14所示。

由图14显示各个结构应力变化图可以看出：

当运输车辆满载停靠在工况3所示位置时，中间盖板沿板4横向布置(BH-4)的应变计显示结构所受应力比其他位置盖板要大，计算后所得的应力值与前述有限元计算的结果较为相近；横梁1跨中的应变计所在位置所受应力为10.39 MPa，大于其他横梁最大应力值，实测结果与前述有限元分析得到的结果相互映证，表明该点确为最不利荷载处以及最危险点；纵梁应力值在初始状态与运输车辆满载加载后的变化较小，表明该结构承载能力较高，相对于横梁的安全性评估可定义为可靠结构；钢构中柱在该工况处应力变化最大，在不考虑钢构柱失稳仅考虑结构强度的条件下，钢构柱的承载能力达到规范和计算所设计的要求。

当运输车辆停靠在工况4所示位置时，中间盖板所受应力下降，边部盖板沿长边方向和沿短边方向跨中的位置所受应力开始增大，计算后所得的应

力值相对于工况3中间盖板所受应力值较小且满足规范和计算后承载能力要求；最危险位置所在处横梁1所受荷载开始下降，横梁2和横梁3所受应力开始增加，与运输车辆位置和前述有限元计算结果相对应，横梁2和横梁3均满足计算设计和规范承载力要求；纵梁整体变化较小，运输车辆在各种工况下都满足强度要求；钢构柱所受轴力减小，与运输车辆停靠位置和前述有限元计算结果相呼应。

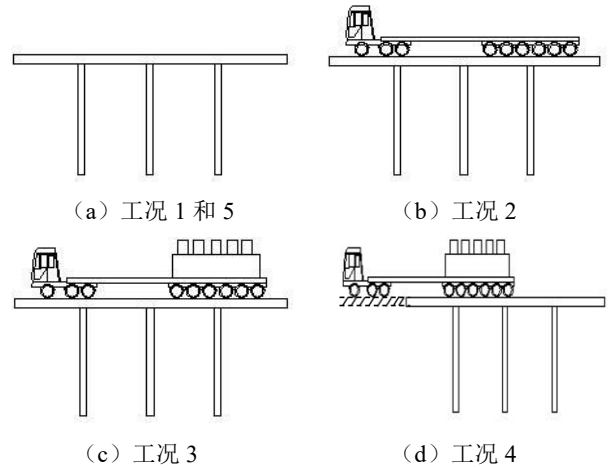
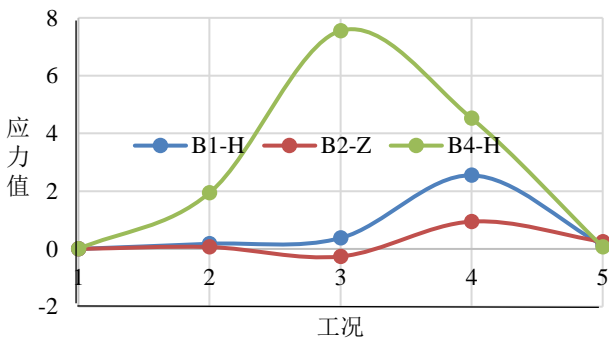
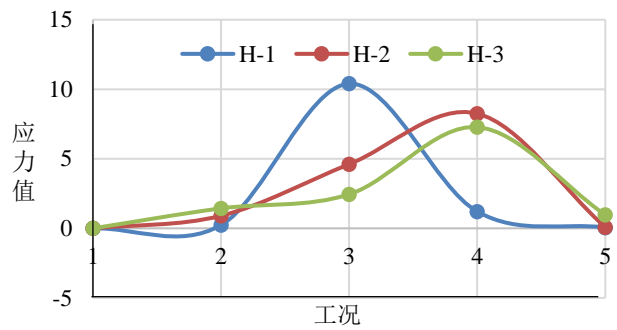


图13 前盾运输车辆相对栈桥位置图

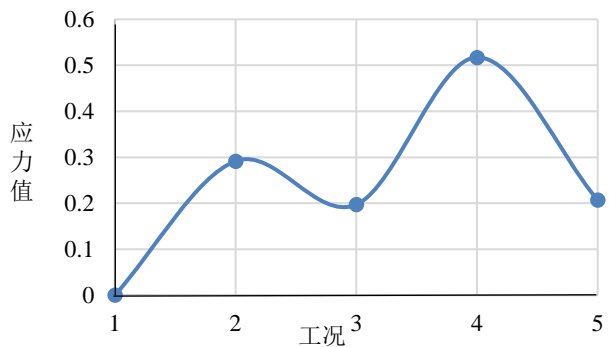
Fig. 13 The position of the front shield transport vehicle relative to the trestle bridge



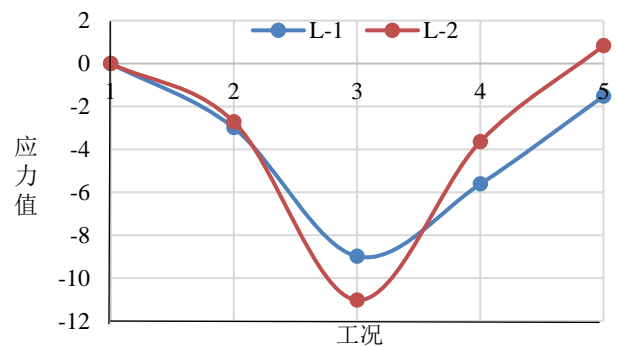
(a) 前盾荷载下盖板应力变化曲线 (MPa)



(b) 前盾荷载下横梁应力变化曲线 (MPa)



(c) 前盾荷载下纵梁应力变化曲线 (MPa)



(d) 前盾荷载下柱应力变化曲线 (MPa)

图14 前盾荷载下栈桥各个结构所受应力变化曲线

Fig. 14 Stress variation of each structure of trestle bridge under front shield load

表 2 前盾加载实测原始数据 (单位: F 频率模数)  
Tab. 2 Measured data of front shield load (Unit: F frequency mode)

结构	通道	测点	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
板	1	B1	1 030.54	1 031.92	1 033.92	1 050.28	1 031.61
	4	B2	952.12	952.62	949.96	959.46	954.16
	15	B4	1 039.34	1 054.38	1 101.81	1 074.37	1 039.91
横梁	5	H1	1 084.81	1 086.61	1 170.82	1 094.19	1 085.30
	10	H2	951.98	958.97	990.09	1 015.92	952.64
	18	H3	963.43	974.56	983.65	1 019.82	971.40
纵梁	17	Z1	928.14	930.40	929.77	932.15	929.85
柱	13	L1	906.04	902.25	894.67	898.93	904.11
	14	L2	982.65	979.21	968.70	978.04	983.70

现场监测过程中结构各薄弱处均未达到强度危险警报值。通过对前盾各结构在不同工况下所受应力变化的现场实时监测以及与前述有限元计算共同控制过程, 说明该方法和结果具有一定可靠、合理性。

### 3.2 中盾加载监测

由于监测在凌晨进行, 以及现场场地限制和夜晚视野范围小, 考虑运输过程安全运输车辆司机未能在中间点位停靠, 实测只测到了加载前、加载后以及运输车辆驶离栈桥的数据。运输车辆在加载时相对栈桥的位置、测量原始数据以及各个结构的应

力变化图将由下文给出。

如图 15 所示为运输车辆在栈桥上的相对位置。图中所示位置工况与前盾运输工况所描述的工况情况相同, 不再赘述。

中盾加载实测原始数据如表 3 所示, 处理后的中盾加载实测变化折线图如图 16 所示。

从图 16 可以看出, 运输车辆行进过程中, 不同工况时各个结构构件所受应力变化与前盾运输产生的应力变化规律相同。由于运输中盾荷载小于运输前盾荷载, 所以各个结构所受应力均小于前盾, 均未达到警报值。

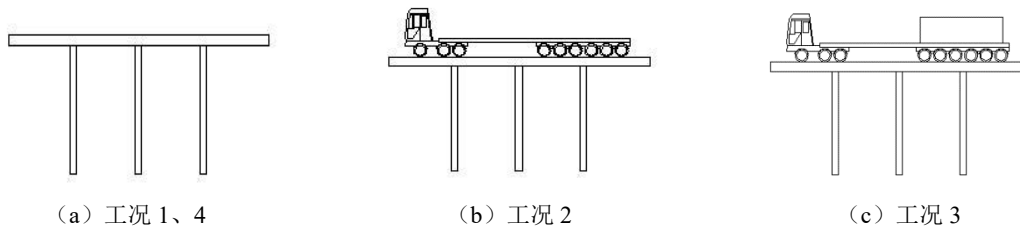
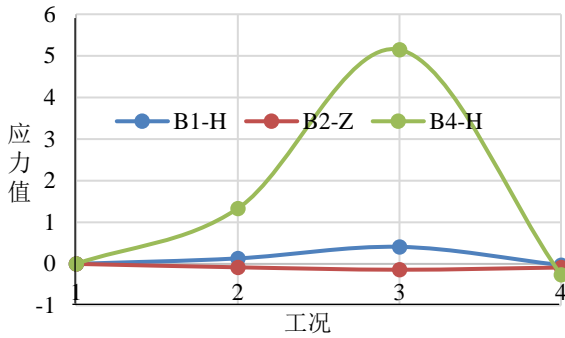


图 15 中盾运输车辆相对栈桥位置图

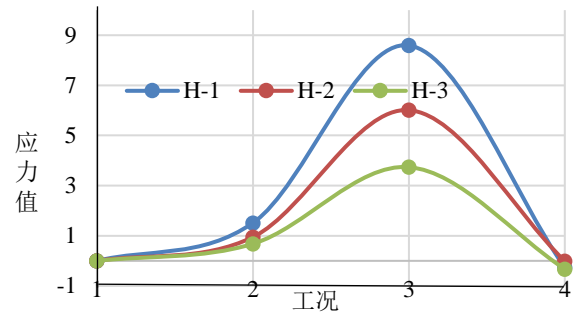
Fig. 15 The position of the transport vehicle of the medium shield machine relative to the trestle bridge

表 3 中盾加载实测原始数据 (单位: F 频模)  
Tab. 3 Measured of medium shield machine loads (Unit: F frequency mode)

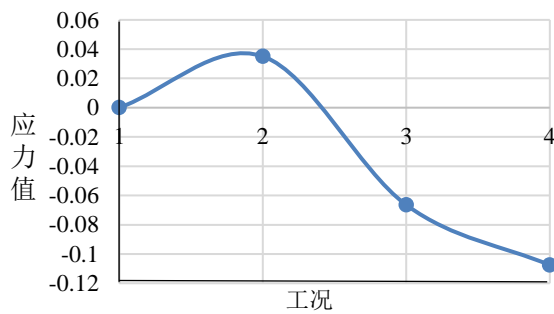
结构	通道	测点	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
板	1	B1	1 030.57	1 031.66	1 033.96	1 030.32
	4	B2	949.44	948.76	948.28	948.72
	15	B4	1 031.91	1 042.91	1 074.49	1 029.75
横梁	5	H	1 076.36	1 088.87	1 147.43	1 074.11
	10	H	944.74	952.58	994.46	944.64
	18	H-3	963.32	968.93	994.23	960.60
纵梁	17	Z-1	926.40	926.69	925.85	925.51
柱	13	L-1	902.10	900.28	895.06	902.18
	14	L-2	982.76	979.80	970.96	982.31



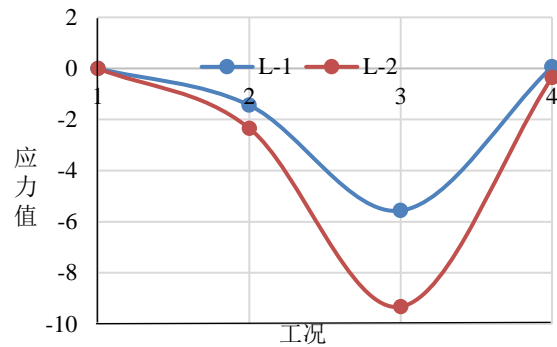
(a) 中盾荷载下盖板所受应力变化曲线 (MPa)



(b) 中盾荷载下横梁所受应力变化曲线 (MPa)



(c) 中盾荷载下纵梁应力变化曲线 (MPa)



(d) 中盾荷载下柱应力变化曲线 (MPa)

图 16 中盾荷载下栈桥各个结构所受应力变化曲线

Fig. 16 Stress variation curve of each structure of trestle bridge under mid-shield load

## 4 结 论

本文结合实际工程,通过有限元数值模拟方法对临时栈桥受力进行分析研究,得到纵横梁、盖板、柱的容许应力与弯矩值。通过车辆荷载作用时临时栈桥的实时监测,得到监测值与模拟值较为接近,从而验证了现场监测及数值模拟的合理性及其可靠性。本文的研究成果及应对建议可为临时盾构栈桥建设的设计和施工提供借鉴和交流。

## 参考文献

- [1] 马明,黄登侠. 钢栈桥的结构设计分析和计算[J]. 公路交通科技, 2013(8): 147-152.  
MA Ming, HUANG Deng-xia. Structural design analysis and calculation of steel trestle bridge[J]. Highway and Transportation Research and Development, 2013(8): 147-152.
- [2] 覃勇刚. 杭州湾跨海大桥南岸超长栈桥设计研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.  
QIN Yong-gang. Research on the design of super-long trestle bridge on the south bank of Hangzhou Bay Sea-crossing Bridge[D]. Nanjing: Southeast University,

2006.

- [3] 张燕. 施工栈桥在深基坑工程中应用技术研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(S1): 783-787.  
ZHANG Yan. Research on application technology of construction trestle in deep foundation pit engineering[J]. Building Structure, 2018, 48(S1): 783-787.
- [4] 姜枫, 朱艳峰. 特大钢栈桥海上施工结构承载力研究与方案设计[J]. 铁道科学与工程报, 2018, 15(6): 1487-1493.  
JIANG Feng, ZHU Yan-feng. Research on bearing capacity and scheme design of offshore construction structure of extra-large steel trestle bridge[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(6): 1487-1493.
- [5] 李程远, 肖长华, 杨威. 彬江袁河特大桥临时钢栈桥施工技术[J]. 施工技术, 2014, 43(12): 75-78.  
LI Cheng-yuan, XIAO Chang-hua, Yang Wei. Construction technology of temporary steel trestle bridge of Binjiang Yuanhe Bridge[J]. Construction Technology, 2014, 43(12): 75-78.
- [6] 田娥, 杨正军, 李毅, 等. 大型钢结构工程中临时钢栈桥设计及验算[J]. 工业建筑, 2012, 42(9): 157-161.  
TIAN E, YANG Zheng-jun, LI Yi, et al. Design and



- checking calculations of temporary steel trestle bridge in large-scale steel structure engineering[J]. *Industrial Construction*, 2012, 42(9): 157–161.
- [7] 贾坚, 刘传平, 张羽. 在软土深基坑栈桥上运行铁路列车的安全稳定控制技术[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(S1): 324–329.
- JIA Jian, LIU Chuan-ping, ZHANG Yu. Safety and stability control technology for railway trains running on trestle bridges in soft soil deep foundation pits[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(S1): 324–329.
- [8] 冯明宇. 成套式模块栈桥静载试验研究与有限元分析[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2018.
- FENG Ming-yu. Static load test research and finite element analysis of complete modular trestle bridge[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2018.
- [9] 胡义新, 李文俊. 带钢锚桩的超宽多功能钢栈桥设计及特殊施工技术[J]. *中外公路*, 2016, 36(6): 171–176.
- HU Yi-xin, LI Wen-jun. Design and special construction technology of super wide multifunctional steel trestle bridge with steel anchor piles[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2016, 36(6): 171–176.
- [10] 罗天洋, 潘艳颜, 高树清, 等. 新型钢管式栈桥结构的设计方法与施工工艺[J]. *钢结构*, 2016, 31(8): 71–74, 104.
- LUO Tian-yang, PAN Yan-yan, GAO Shu-qing, et al. The design method and construction technology of the new steel pipe trestle structure[J]. *Steel Structure*, 2016, 31(8): 71–74, 104.

## 【简 讯】

### 第三届土木建筑与能源科学国际学术会议

#### 会议简介:

第三届土木建筑与能源科学国际学术会议 (CAES2021) 定于 2021 年 3 月 19 日至 21 日在中国杭州召开。会议将围绕土木建筑、能源科学与环境工程的技术发展及存在问题展开讨论。本会议旨在为从事土木建筑、能源科学与环境工程研究的专家学者、工程技术人员、技术研发人员提供一个共享科研成果和前沿技术, 了解学术发展趋势, 拓宽研究思路, 加强学术研究和探讨, 促进学术成果产业化合作的平台。大会诚邀国内外高校、科研机构专家、学者, 企业界人士及其他相关人员参会交流。

#### 论文出版:

(1) CAES2021 所有录用的论文将被 EI 目录系列期刊 E3S Web of Conferences (ISSN: 2267-1242) 出版, 见刊后由出版社提交至 EI 检索, 目前该期刊 EI 检索非常稳定。

(2) 推荐 10 篇优秀论文到 SCI 期刊, 录满截止, 欢迎投稿。

本次会议可接受中文投稿。中文投稿先安排审稿 (中文稿件只能通过邮箱 CAES2018@163.com 投稿)。具体事宜, 请提前咨询会务组老师。

#### 征文主题:

- (1) 土木建筑
- (2) 水利工程
- (3) 交通工程
- (4) 林业工程
- (5) 材料科学与工程
- (6) 化学能源与化学材料
- (7) 能源工程和能源技术
- (8) 环境科学与环境工程
- (9) 电气、自动化和动力工程
- (10) 其它相关领域

#### 大会秘书处:

Kelly Chen 陈老师

手机: 13711322672 (微信)