

上跨软土深基坑干线铁路便桥动力特性研究

马坤全, 孙运通, 陈 昊

(同济大学 桥梁工程系, 上海 200092)

摘要:以某铁路大型车站改建工程软土深基坑施工为背景,拟定了多个钢格构柱现浇钢筋混凝土梁板连续刚构便桥设计方案,针对便桥结构体系伴随软土深基坑挖土施工而不断发生变化的特点,系统计算分析了软土深基坑挖土过程便桥结构全桥体系的动力特性,得到一些有益的结论,可供上跨深基坑干线铁路便桥设计和基坑挖土施工参考。

关键词:干线铁路便桥;钢格构柱连续刚构体系;软土深基坑;结构动力特性

中图分类号:U448.25 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-0373(2012)03-0010-07

0 引言

某铁路大型车站改建工程,为确保大规模软土深基坑开挖期间营业线的运营安全,尽可能减小施工对列车运营的影响,该工程施工设计时采用临时便桥结构满足本站临时过站正线的安全运营需要,最终实现南北基坑区基坑一次开挖的总体目标。该方案成功实现了一次架空双线铁路干线,上跨大规模基坑工程的目标,有效地克服了传统的便梁方案跨度有限、单股道架空、限速较低等对行车产生较大影响的缺点,从而达到缩短工程建设总工期、减少深基坑施工对临时过站正线行车影响、提高工程施工及营业线运营安全度的最终目标。

临时铁路便桥采用钢格构柱+支撑+现浇钢筋混凝土梁板连续刚构体系,设计总长度为133.6 m,宽度为12.9 m。基础采用钻孔灌注桩,内插L200×200×20 mm四肢角钢加工而成的缀板式格构柱^[1],插入深度6 m,钢格构柱伸入梁体85 cm,钢格构柱最大外露高度约22 m,立柱纵向间距最大为6.0 m,最小3.8 m,共24跨,铁路便桥结构如图1所示。该便桥结构结构型式明显不同于常见的桥梁结构^[2],也不同于传统的钢便梁结构^[3],且其结构体系伴随深基坑挖土施工而不断发生变化,因此,对其动力特性进行系统分析对于结构的合理设计和深基坑的挖土施工有着重要的参考价值和理论意义。

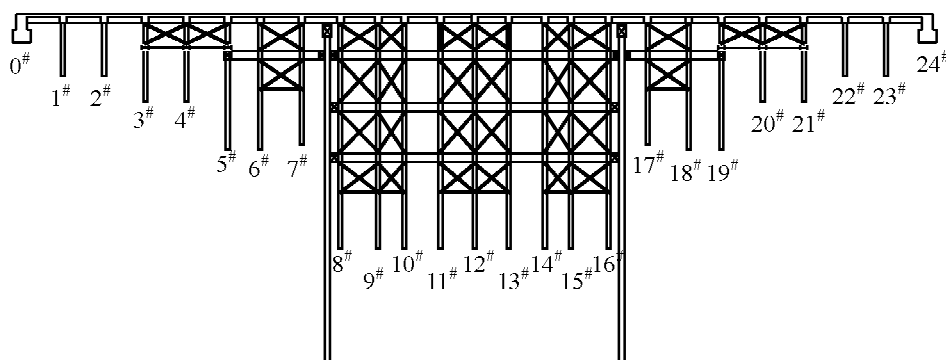


图1 临时铁路便桥立面图

收稿日期:2012-05-15

作者简介:马坤全 男 1964年出生 副教授

基金项目:上海市科学技术委员会资助项目(10230501400)

1 分析工况

根据临时铁路便桥的结构特点及土方开挖和支撑施工顺序,拟对如下5个便桥施工状态进行全桥体系动力特性分析。

状态Ⅰ:临时铁路便桥桥面浇筑完毕,并达到设计强度后,在便桥区域土方平衡开挖至 -5.70 m 处(图2)。

状态Ⅱ:便桥区域土方开挖至 -8.30 m 处,焊接完第1层剪刀撑,并浇筑完第1层圈梁(图3)。

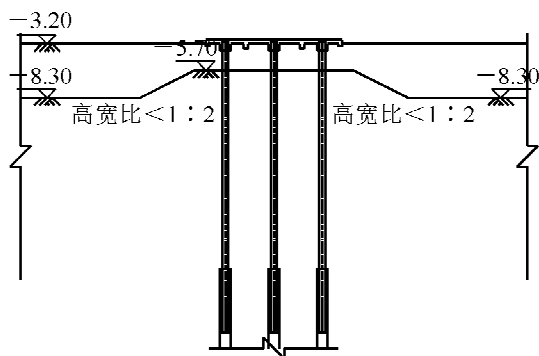


图2 状态Ⅰ便桥结构示意图

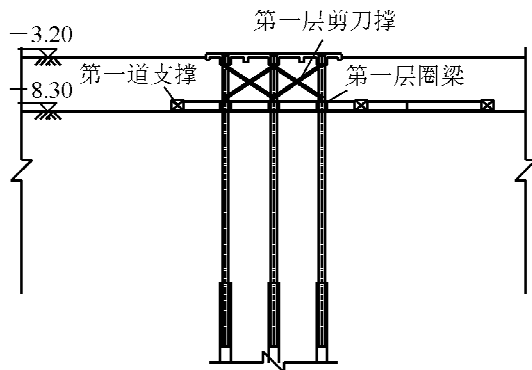


图3 状态Ⅱ便桥结构示意图

状态Ⅲ:便桥区域土方开挖至 -14.45 m ,焊接完第2层剪刀撑,并浇筑完第2层圈梁(图4)。

状态Ⅳ:便桥区域土方开挖至 -20.45 m ,焊接完第3层剪刀撑,并浇筑完第3层圈梁。

状态Ⅴ:临时铁路便桥区域土方平衡开挖至坑底,随挖随浇 300 mm 厚C40早强混凝土加筋垫层,并焊接第4层剪刀撑(图5)。

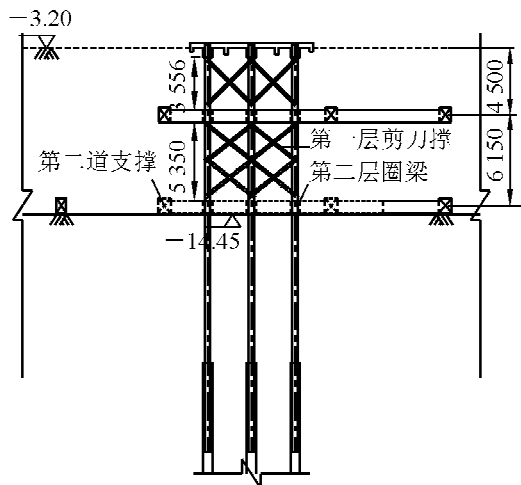


图4 状态Ⅲ便桥结构示意图(单位:mm)

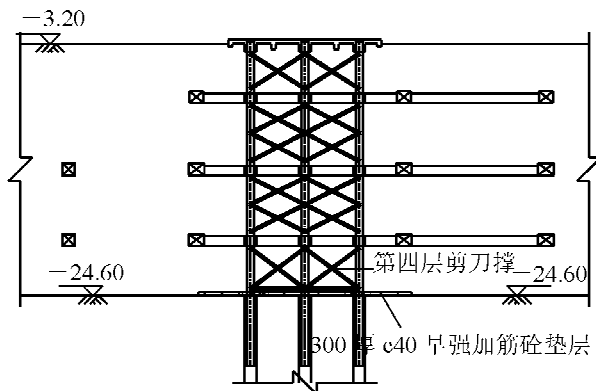


图5 状态Ⅴ便桥结构示意图

2 便桥结构动力计算模型及参数

2.1 动力计算模型

采用MIDAS/CIVIL建立便桥结构动力计算模型,并计算全桥体系动力特性。钢筋混凝土板梁及垫层混凝土采用空间板壳单元模拟,钢格构柱、剪刀撑及圈梁均采用空间杆单元模拟;钢格构柱与板梁固结,连续墙对板梁的支撑按纵向活动铰支座考虑;桩基对墩梁体系的弹性约束作用通过在柱底(桩顶)施加弹性刚度矩阵加以考虑,基础等效弹性刚度矩阵采用自编的Pile程序按照实际土层资料根据“m”法进行计算^[4];桥上轨道结构(道砟、轨枕、钢轨等构件)等二期恒载作为附加质量施加在板梁上。典型施工状态对应的便桥结构动力计算模型如图6~图8所示。

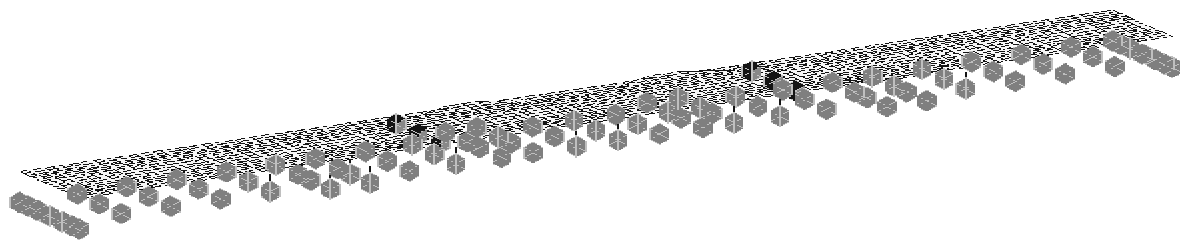


图 6 状态 I 便桥结构动力计算模型

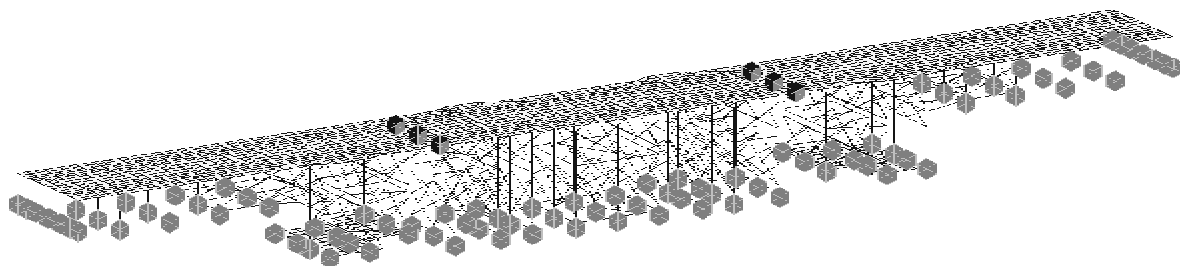


图 7 状态 III 便桥结构动力计算模型

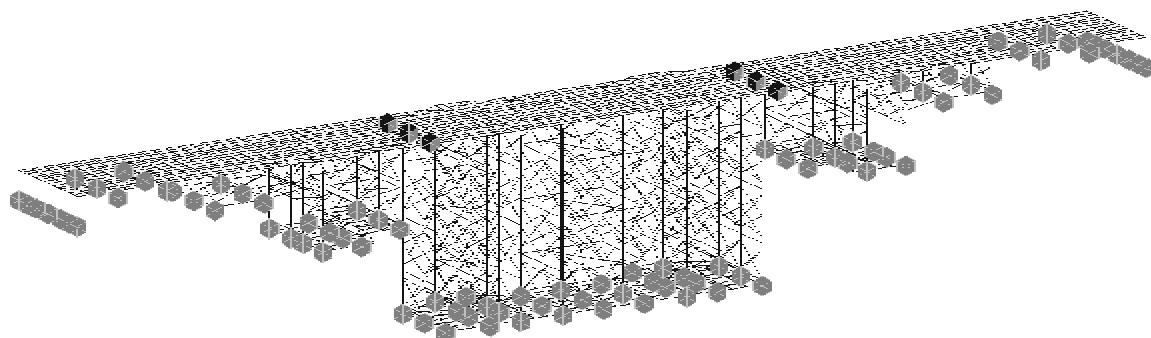


图 8 状态 V 便桥结构动力计算模型

2.2 主要计算参数

板梁、圈梁及混凝土垫层均为钢筋混凝土结构,考虑到混凝土的弹性模量在多次重复荷载作用后降低约 20%~25%^[5],因此,板梁、圈梁及混凝土垫层的弹性模量取为 $0.8E = 2.72 \times 10^4 \text{ MPa}$ 。

3 便桥动力特性

3.1 临时铁路便桥结构方案

为了计算分析不同便桥结构的动力特性,从而为干线铁路便桥结构设计提供优化方案,参考某大型铁路车站改建工程临时铁路便桥的设计拟定了以下四种便桥结构方案。

(1)有连续墙支撑,采用钢筋混凝土圈梁,即为铁路车站改建工程铁路临时便桥设计方案,便桥结构借用了深基坑围护设置的连续墙。

(2)无连续墙支撑,采用钢筋混凝土圈梁,即模拟无深基坑围护用连续墙对便桥结构的支撑(约束)作用情况。

(3)有连续墙支撑,圈梁采用 28a 槽钢(同剪刀撑型号)。

(4)无连续墙支撑,圈梁采用 28a 槽钢(同剪刀撑型号)。

其中第(3)、(4)方案采用 28a 槽钢取代钢筋混凝土圈梁,可大大缩短圈梁的施工周期,从而缩短便桥区域土体开挖对列车运营影响的时间,并便于圈梁拆除及回收。

3.2 方案 1 便桥结构动力特性

表 1 为状态 V 便桥体系前 5 阶及梁体竖向 1 阶自振特性;图 9~图 13 为状态 V 便桥结构的典型主振

型。表 2 所示方案 1 便桥结构 5 个典型状态竖、横向基频计算值。

表 1 状态 V 便桥结构自振特性

阶数	频率/Hz	振型描述
1	3.09	梁体纵飘
2	4.57	梁体一阶侧弯(横向)
3	4.77	梁体二阶侧弯
4	6.55	连续墙间部分钢格构柱横向弯曲
5	6.99	剪刀撑局部振动
21	7.88	梁体一阶竖弯

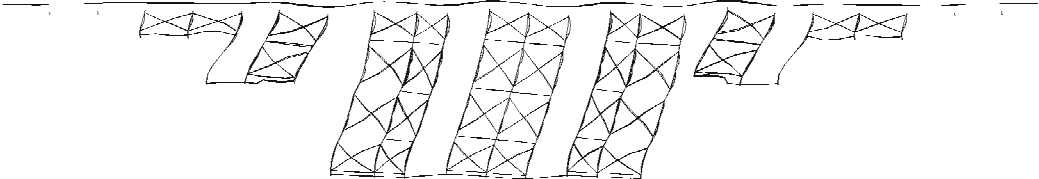


图 9 状态 V 便桥结构纵飘振型 ($f=3.09\text{ Hz}$)

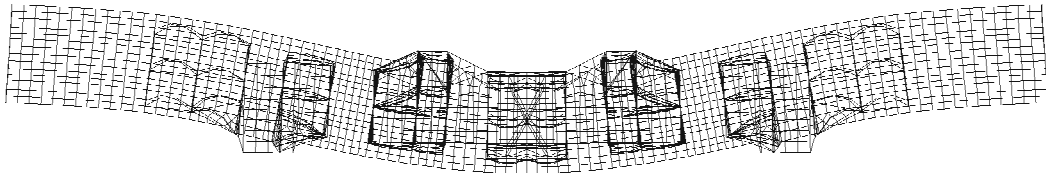


图 10 状态 V 便桥结构一阶横向挠曲振型 ($f=4.57\text{ Hz}$)

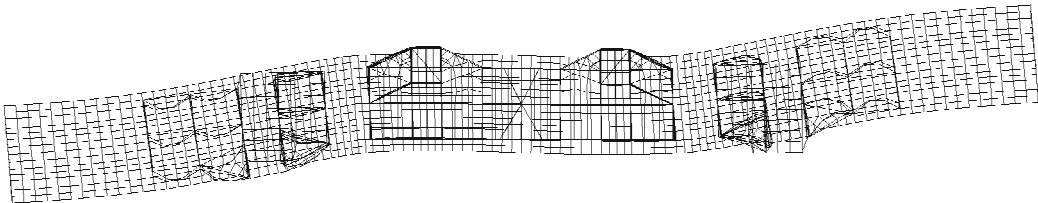


图 11 状态 V 便桥结构二阶横向挠曲振型 ($f=4.77\text{ Hz}$)

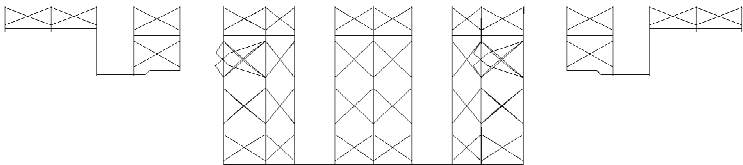


图 12 状态 V 便桥结构剪刀撑局部振动模态 ($f=4.77\text{ Hz}$)

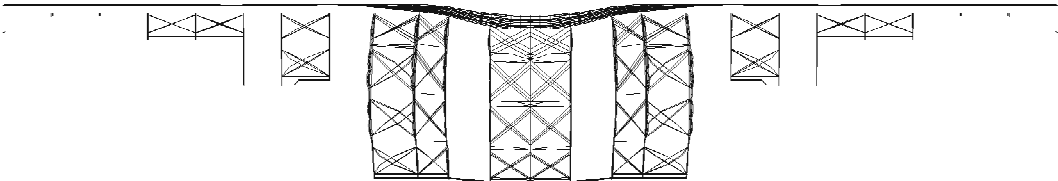


图 13 状态 V 便桥结构一阶竖向挠曲模态 ($f=7.88\text{ Hz}$)

表 2 典型状态便桥结构竖、横向基频

振动方向						Hz	
	I	II	III	IV	V	最大值	最小值
横向	4.61	4.45	4.39	4.58	4.57	4.61	4.39
竖向	11.39	10.50	9.16	8.38	7.88	11.39	7.88

由表 2 可知,方案 1 便桥结构竖向刚度大于横向刚度。

从表 2 可看出,由于方案 1 便桥结构有两个横向刚度很大的连续墙对便桥的钢筋混凝土板梁形成强大的横向约束作用,且该便桥为双线桥(板梁宽度达 12.9 m),该便桥结构的横向刚度主要由上部结构(钢筋混凝土梁体)的横向刚度控制,下部结构(包括钢格构柱及桩基础)横向刚度的变化对结构整体横向刚度影响不大,5 个便桥状态的最大与最小横向基频相差低于 5%。

分析表 2 还可知,从状态 I 至状态 V,由于钢格构柱露出地面的长度(暴露于土体之外部分)越来越长,立柱的纵向刚度逐渐减小,因此,便桥结构的竖向基频呈现逐渐减小的规律。

3.3 方案 2 便桥结构动力特性

表 3 表示方案 2(无连续墙支撑)便桥结构 5 个典型状态竖、横向基频计算值;图 14 为状态 V 便桥结构一阶横向挠曲振型。

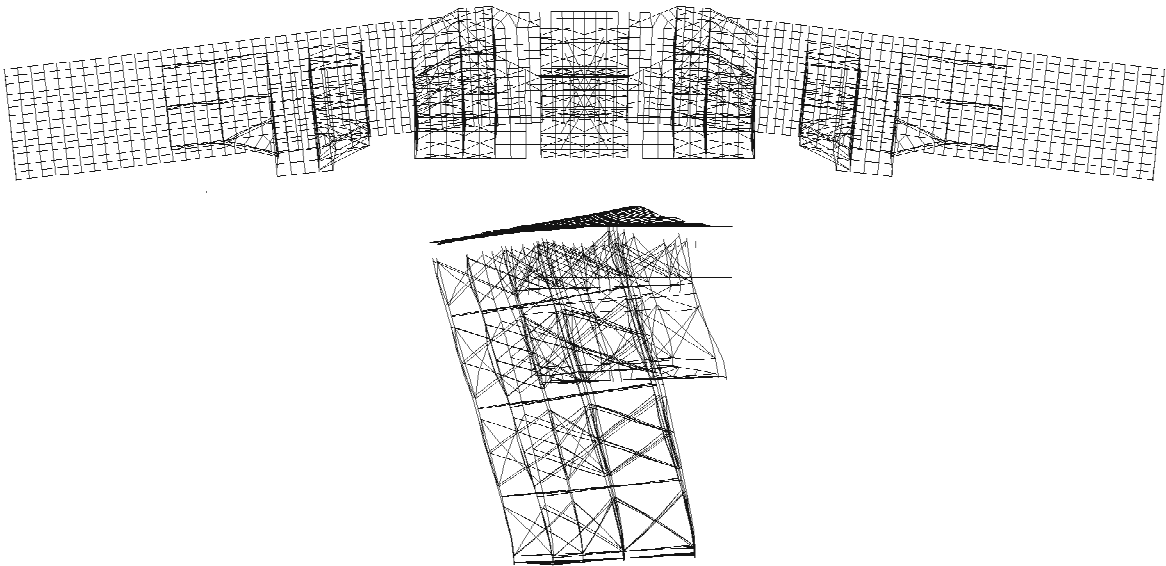


图 14 状态 V 便桥结构一阶横向挠曲振型($f=2.29\text{ Hz}$)

表 3 方案 2 典型状态便桥结构竖、横向基频

振动方向						Hz	
	I	II	III	IV	V	最大值	最小值
横向	3.33	3.10	2.58	2.41	2.29	3.33	2.29
竖向	11.32	10.64	9.04	8.36	7.89	11.32	7.89

从表 3 同样可看出,方案 2 便桥结构(无连续墙对钢筋混凝土板梁的支撑)竖向刚度明显大于横向刚度。

比较表 3 与表 2 可知,方案 2 便桥结构的横向基频较方案 1 的相应值明显降低,两个方案便桥结构的竖向基频则相差不大。

由图 15 可知,钢格构柱对便桥体系横向振动的参与作用是非常明显的。

分析表 3 可知,由于方案 2 便桥结构取消了两个用作围护深基坑的连续墙对钢筋混凝土板梁的横向约束作用,使得便桥上部结构(钢筋混凝土板梁)的横向刚度大大降低,也显著改变了便桥上、下部结构的横向刚度比,从而导致便桥下部结构(包括钢格构柱及桩基础)的横向刚度对整个便桥体系的横向刚度的作用明显增强,方案 2 便桥结构从状态 I 至状态 V,由于钢格构柱露出地面的长度(暴露于土体之外部分)越来越长,墩柱的横向刚度逐渐减小,因此,便桥结构的横向基频也出现较快减小的现象,状态 V 便桥的横向基频仅为状态 I 结构相应值的 68.8%。

同理,方案2便桥结构从状态Ⅰ至状态Ⅴ,其竖向基频也呈现逐渐减小的规律,状态Ⅴ便桥的竖向基频为状态Ⅰ结构相应值的69.7%。

3.4 方案3便桥结构动力特性

表4表示方案3便桥结构5个典型状态竖、横向基频计算值。

比较表4与表2可知,尽管槽钢的轴向及抗弯刚度略小于钢筋混凝土圈梁,但其质量也低于混凝土圈梁,因此,方案3便桥结构的竖、横向基频与方案1的相应值相差不大,且从状态Ⅰ至状态Ⅴ便桥结构频率的变化规律也基本一致。

表4 方案3便桥结构竖、横向基频

振动方向	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	最大值	最小值
横向	4.61	4.50	4.44	4.64	4.64	4.64	4.44
竖向	11.39	10.92	9.86	9.15	8.67	11.39	8.67

3.5 方案4便桥结构动力特性

表5表示方案4便桥结构5个典型状态竖、横向基频计算值。

比较表5与表3可知,方案4便桥结构的竖、横向基频与方案2的相应值相差不大,且从状态Ⅰ至状态Ⅴ便桥结构频率的变化规律也相差无几。

表5 方案4便桥结构竖、横向基频

振动方向	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	最大值	最小值
横向	3.33	3.21	2.56	2.37	2.24	3.33	2.24
竖向	11.32	11.10	9.84	9.15	8.67	11.32	8.67

4 结语

通过对临时铁路便桥结构动力特性的计算分析,得到如下初步结论与建议。

(1)便桥结构的竖向计算频率明显大于其横向频率,该桥的动力性能主要由其横向刚度控制。

(2)某铁路车站改建工程临时铁路便桥设计方案(方案1)有效利用了两个横向刚度很大的连续墙对便桥的钢筋混凝土板梁的强大横向约束作用,使得该便桥上部结构(钢筋混凝土板梁)的横向刚度明显提高,大大弱化了下部结构(包括钢格构柱及桩基础)横向刚度对便桥结构整体横向刚度的影响,从而显著提高了全桥体系的横向刚度,结构横向基频达到4.57 Hz。

(3)如无围护基坑的连续墙对便桥梁体的横向约束作用,则便桥下部结构的横向刚度对全桥体系的横向刚度有着较大的影响,随着基坑的逐步开挖,墩柱的横向刚度逐渐减小,使得便桥结构的横向频率不断降低;无连续墙支撑便桥体系的横向基频仅为2.29 Hz(对应于基坑设计最大开挖深度状态),但仍大于参考《铁路桥梁检定规范》按等效刚度法计算的桥墩横向自振频率通常值1.80 Hz。

(4)采用型钢(如与剪刀撑型号相同的槽28a)代替横、纵向钢筋混凝土圈梁,对便桥结构的整体横向刚度影响甚微,而结构竖向频率略有提高(型钢质量明显小于混凝土圈梁);但这一方案可大大加快圈梁的施工速度,从而缩短便桥区域土体开挖对列车运营影响的时间,并利于圈梁的拆除及回收。

(5)我国目前的《检规》及《铁路桥涵设计规范》规定的桥墩或桥跨结构横向最低频率和横向振幅限值或通常值主要适用于混凝土实腹桥墩或简支梁结构,而该上跨软土深基坑临时铁路便桥为钢格构柱连续刚构体系,因此,有关规范并不能直接用来评判该便桥的横向刚度,有必要进行客货列车与便桥系统的空间耦合振动分析,依据列车通过便桥全过程的运营性能指标及结构振动响应值对便桥结构的竖、横向刚度进行综合评估。

参 考 文 献

- [1]沈祖炎,陈扬骥,陈以一. 钢结构基本原理[M]. 2版. 北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [2]夏禾. 桥梁工程[M]. 北京:高等教育出版社,2011.
- [3]刘旭伟. 贝雷梁便桥的检算及安全使用方法[J]. 贵州大学学报:自然科学版,2009(1):120-123.
- [4]铁道第三勘察设计院. TB 10002.5—2005 铁路桥涵地基和基础设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社,2005.

[5] 铁道第三勘察设计院. TB 10002.1—2005 铁路桥涵设计基本规范[S]. 北京:中国铁道出版社, 2005.

Study on Dynamic Property of Temporary Railway Bridge Overpassing Weak Soil Deep Foundation Pit

Ma Kunquan, Sun Yuntong, Chen Hao

(Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on soft soil deep foundation pit construction in a large railway station reconstruction project, a few design proposals of continuous rigid frame temporary railway bridge consisting of steel lattice column and cast-in-place reinforced concrete beam slab are studied. In view of the constant changing of temporary railway bridge system in process of earth cutting, the dynamic properties of whole temporary railway bridge system are calculated and analysed systematically. Some useful conclusions are got which could be referenced for design of temporary railway bridge overpassing weak soil deep foundation pit.

Key words: temporary railway bridge; continuous rigid frame system with steel lattice column; weak soil deep foundation pit; structure dynamic property

(责任编辑 刘宪福)

~~~~~

(上接第 5 页)

## 参 考 文 献

- [1] 范立础. 桥梁抗震[M]. 上海:同济大学出版社, 1997.
- [2] 中华人民共和国铁道部. GB50111—2006 铁路工程抗震设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社, 2006.
- [3] 朱永生, 劳远昌, 沈大元, 等. 桥梁地震反应分析中输入地震波的确定[J]. 桥梁建设, 2000(3):1-4.
- [4] 李光辉. 大跨度连续刚构桥空间地震反应分析[D]. 四川:西南交通大学土木工程学院, 2005.

## Effect on Seismic Performance of Bridge for Jin-bin Mass Transit by Pier-underpinning

Liu Yanxia, Bu Jianqing

(School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** The pier-underpinning of Jin-bin mass transit is taken as the research object, and ANSYS software is used in the vibration characteristics and dynamic responses analysis and pile-soil common function is considered in the numerical simulation. The response spectrum method and time history method are used to calculate the dynamic responses of the bridge structure before and after the pier-underpinning. The results show that the basic cycle of the bridge structure becomes smaller, and the maximum shear values and the maximum bending moment values of the piers bottom increase, but the maximum deflection values of the piers top decrease after the pier-underpinning. Thus the pier-underpinning improves the stiffness and seismic performance of the bridge structure system.

**Key words:** bridge; underpinning; seismic loading; dynamic responses

(责任编辑 车轩玉)