

# 在软土深基坑栈桥上运行铁路列车的安全稳定控制技术

贾 坚<sup>1, 2</sup>, 刘传平<sup>1, 2</sup>, 张 羽<sup>2</sup>

(1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海 200092)

**摘要:** 结合近年来承担设计的“改建铁路宁波站改造工程”, 对我国软土地区铁路客站与换乘地铁等市政设施一体化建设过程中, 为节省建设工期, 同时保证原既有正线的正常运行以及深基坑开挖安全等疑难技术问题进行探索实践, 研究提出并设计了在铁路站房与换乘地铁一体化开挖期间, 深基坑栈桥上运行铁路列车的安全稳定应对控制措施, 从而保证铁路客站与换乘地铁一体化建设实施的“多、快、好、省”。该研究成果及应对技术措施可为软土地区同类铁路客站建设的设计和施工提供借鉴和交流。

**关键词:** 软土; 深基坑; 栈桥; 列车; 稳定

**中图分类号:** TU473      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2012)S0-0324-06

**作者简介:** 贾 坚(1963-), 男, 教授级高工, 同济大学工学博士, 主要从事软土基坑卸载变形控制的设计咨询研究工作。E-mail: jiajian@tongji.edu.cn。

## Safety and stability technology for railway trains running on trestle bridges above soft soil excavations

JIA Jian<sup>1, 2</sup>, LIU Chuan-ping<sup>1, 2</sup>, ZHANG Yu<sup>2</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Architectural

Design & Research Institute of Tongji University (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

**Abstract:** This paper makes an effort to solve such difficult technical problems as saving construction period, ensuring the normal operation of existing railway lines and the security of deep excavations. Ningbo comprehensive transport hub, a construction integration of railway station and subway station, is cited as an illustration. In this project, reasonable and effective measures are proposed to ensure the security and stability of railway trains running on trestle bridges during the excavation. Meanwhile, the key points in the design and construction of comprehensive urban transportation hub are summarized to ensure the “quantity, rapidness, quality, economical efficiency” in the construction. It may provide a reference for future similar projects in soft soil area.

**Key words:** soft clay; deep excavation; trestle bridge; high-speed train; stability

## 0 引言

随着我国建设的快速发展, 铁路客站规划与城市规划相互融合, 一大批集铁路与地铁及其它换乘交通方式于一体的新型城市综合交通枢纽应运而生。为贯彻“以人为本”的宗旨, 国铁站房与地铁换乘通常设于国铁站房地下中央出站通道下方, 以实现“零换乘”的便捷换乘。

当这类国铁站房与换乘地铁于一体的工程建造于我国沿海软土地区时, 由于地质土层主要由饱和黏性土、粉性土以及砂土组成, 一般具有成层分布特点。土体性质具有高含水率、高孔隙比、高灵敏度、低强度、高压缩性等不良地质特点。由此带来此类超深、超大基坑及“坑中坑”开挖施工期间的安全稳定及控制难题; 同时由于国铁施工工期紧, 如何在二年多时

间内, 在不中断既有正线正常运行的前提下, 通过科学合理的工程筹划和分析, 制定出切实可行和安全的工程实施方案。这些都是在软土地区建造国铁站房与换乘地铁为一体工程建设中所面临的严峻工程技术难题, 需要我们去研究和解决。

本文结合近年来承担设计的“改建铁路宁波站改造工程”铁路站房与换乘地铁一体化建设的工程实践, 对我国软土地区铁路客站与换乘地铁等市政设施一体化建设中“基坑开挖期间栈桥上运行铁路列车的安全稳定控制”的疑难技术问题进行研究分析。在此基础上, 提出合理有效的应对技术措施, 从而为一体化建设项目节省了地下工程一半的建造工期。



图 1 改建铁路宁波站与换乘地铁基坑一体化开挖施工现场

Fig. 1 Integration excavation of Ningbo transport hub

## 1 国铁、地铁地下一体化建造的实施筹划

### 1.1 地下一体化建造的工程背景

改建铁路宁波站改造工程是华东地区铁路网的重要枢纽, 车站位于宁波市海曙区西南老城范围内的宁波站既有站场上。改建宁波站将宁波地铁 2 号线、4 号线引入到车站内, 形成集国有铁路、地铁、公交、出租等市政交通设施为一体的大型综合交通枢纽。因此, 本项目主体基坑为国铁南北通道与地铁 2 号线车站共建, 既有运营正线(沪深线)横跨项目主体基坑, 主体基坑长 265 m, 宽 123 m, 最深达 24 m。

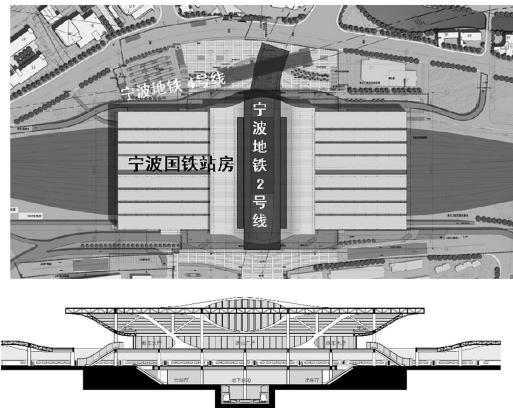


图 2 改建铁路宁波站与换乘地铁的工程关系平剖面示意图

Fig. 2 Spatial relationship between Ningbo reconstructed railway station and subway station

### 1.2 地下一体化建造的实施筹划

根据铁路部门要求, 在改扩建宁波站工程施工期间, 要保证既有正线(沪深线)正常运营。同时要求本项目两年内完成永久正线铺轨, 为此工期十分紧张, 需作深入研究、科学运筹。

为保证既有正线的正常运营, 按传统做法一般将主体基坑设置临时中隔墙, 分为南北(或东西)两坑分别前后进行施工(既有正线位于基坑一侧), 例如杭州东站、苏州站、天津站等, 如图 3 所示, 首先施工南区基坑, 待南区站台层完成, 既有正线搬迁至南区

永久正线位置后, 再施工北区基坑, 从而可保证施工期间既有正线正常运营。但宁波站改建工程工期紧, 如按传统方法, 则因主体基坑开挖深, 实施分区前后施工, 工期长, 不能满足宁波站改造工程的铺轨节点要求。

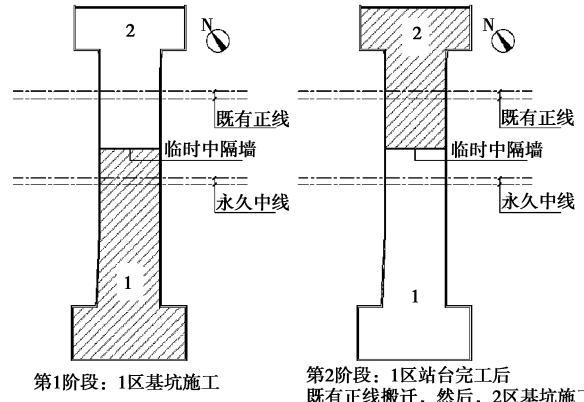


图 3 传统基坑分区实施过渡正线

Fig. 3 Partition of traditional foundation pit

根据本工程特点及要求, 经过科学研究和多方比选, 工程实施筹划采用在基坑栈桥上临时过渡既有正线(沪深线), 从而整体一次性开挖基坑, 基坑栈桥在基坑开挖中临空承担列车运行, 缩短基坑工期一年, 从而可满足工程铺轨及完工节点要求, 具体实施方案为:

在主体基坑整体开挖前, 先将既有正线临时搬迁至既有的其他线路, 然后在既有正线位置处施工临时基坑临时铁路栈桥。栈桥施工完毕后, 在基坑开挖前将正线复位(即正线通过基坑临时铁路栈桥跨过南北通道及地铁基坑), 再一次性整体开挖施工南北通道及地铁基坑。为尽早满足铺轨节点, 根据国铁站房变形缝设置, 在基坑回筑时分为 3 个区, 永久正线段为 A 区(见图 4), A 区回筑阶段支撑避开结构柱, A 区不拆撑快速回筑至轨道层, 从而即可满足正线运营不中断, 同时也满足了永久正线铺轨的节点要求。

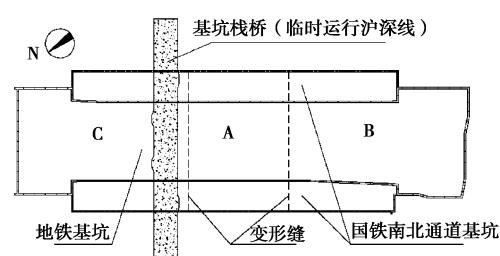


图 4 国铁南北通道结构分区示意图

Fig. 4 Structural partition of north-south channel

## 2 在软土深基坑栈桥上运行列车的安全稳定控制要点

根据铁路要求, 在基坑开挖施工期间设置的临时

铁路栈桥，需保证列车以  $45\sim80 \text{ km/h}$  速度正常过站。为此，铁路栈桥即要满足基坑开挖过程中安全稳定，同时栈桥结构又要满足不同时速列车动荷载作用下栈桥的变形和结构共振的控制要求。

## 2.1 在软土深基坑栈桥上运行列车的安全稳定分析

### (1) 工程地质条件

拟建场地土层主要物理力学指标和土层分布剖面见图 5。

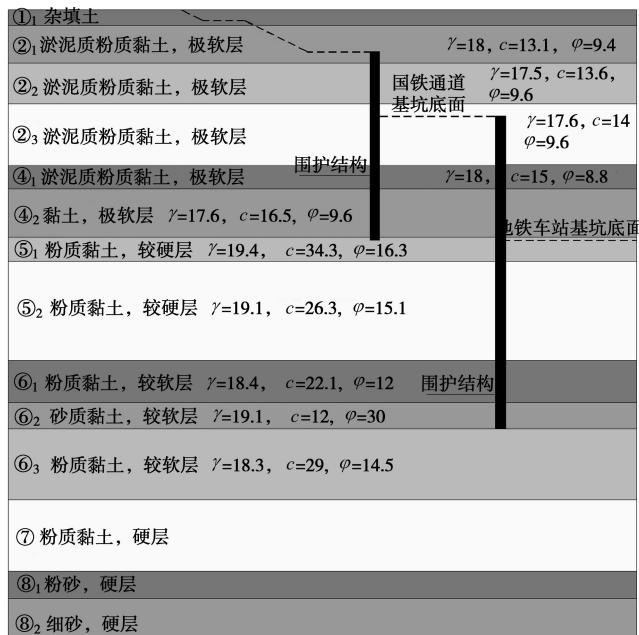


图 5 土层分布剖面图

Fig. 5 Section of soil layers

### (2) 临时铁路栈桥设计参数的选取

临时铁路栈桥采用现浇钢筋混凝土梁板结构，其主要设计参数如下：

- a) 采用  $\phi 1000$  钻孔灌注桩作为栈桥桩，桩间距为  $6 \text{ m}$ ，角钢格构柱规格为  $4\times L200\times20$  (Q345B 级钢)，截面尺寸为  $550\times550$ 。
- b) 现浇混凝土梁板采用 C40 砼，板厚  $350 \text{ mm}$ ，主梁截面为  $1000\times1000$ ，次梁截面为  $600\times800$ 。
- c) 临时铁路栈桥列车运行设计时速为  $\leq 80 \text{ km/h}$  (客车)、 $\leq 45 \text{ km/h}$  (货车)。

d) 按规范要求考虑了桥面二期恒载、人群活载以及列车活载。

### (3) 基坑开挖对临时铁路栈桥的动力特性影响分析

临时铁路栈桥结构的受力和动力特性受栈桥结构刚度的影响较大，而基坑上方的临时铁路栈桥刚度(无论是纵、横向和竖向刚度)随着栈桥下基坑土方开挖的加深，栈桥刚度不断变化，引起栈桥结构动力特性发生变化，将影响到栈桥结构的受力和运营列车的安

全。因此，需对基坑土方卸载对临时铁路栈桥动力特性的影响进行研究分析。

分析采用有限元软件 SAP2000 和 MIDAS/CIVIL 建立栈桥结构计算模型，对桥面板采用板单元模拟，其他构件如型钢柱、桥面梁等均采用空间梁单元模拟，并等效考虑桩基础和坑内加固土体的弹性约束。图 6 为 Sap2000 计算模型图；图 7 为 MIDAS/CIVIL 计算模型图。

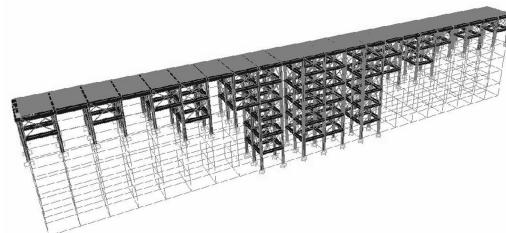


图 6 Sap2000 计算模型图

Fig. 6 Calculation model in SAP2000

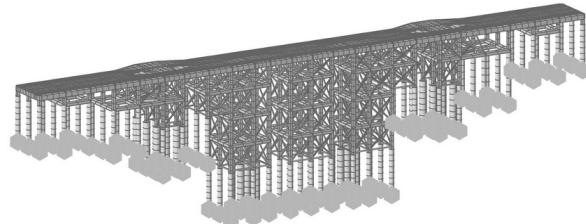


图 7 MIDAS/CIVIL 计算模型图

Fig. 7 Calculation model in MIDAS/CIVIL

分析时共考虑了 3 种类型的列车荷载：2 线 C62 货车、2 线准高速客车、2 线 ICE 高速列车。车桥耦合振动分析工况设置为下行线比上行线延迟  $200 \text{ m}$  进桥，目的是为了先出现单线偏载运行的不利情况，后出现双线同时加载的不利情况。

经计算分析，当基坑开挖到坑底时，栈桥前 10 阶振型均以型钢柱和桥面梁体横向弯曲振动为主，而桥面结构竖向振型未在前 10 阶出现<sup>[4]</sup>。栈桥结构前三阶振型的计算结果详见下表 1，分别为横桥向、顺桥向和桥面扭转振型。

表 1 栈桥自振特性计算汇总表

Table 1 Summary of calculation of natural vibration characteristics of trestle bridges

数	频率/Hz		振型
	Midas	Sap2000	
1	1.340	1.469	横桥向
2	1.380	1.880	纵桥向
3	1.620	2.307	扭转

另外，为确保临时铁路栈桥结构安全及列车行驶舒适度，当列车运行速度  $V\leq 80 \text{ km/h}$  时，在承载力满足的前提下，临时铁路栈桥结构还需满足以下两点要

求:

a)临时铁路栈桥结构计算振动频率不能接近列车振动频率 $f = 0.842^{[3]}$ , 以避免列车振动引起栈桥结构共振, 对结构安全及行车舒适度产生不利影响。

b)临时铁路栈桥结构计算振动频率需大于规范规定的自振频率 $f = 1.106^{[3]}$ 。

经建模分析计算, 临时铁路栈桥结构计算振动频率为 1.469(SAP2000 计算结果)和 1.34(MIDAS/CIVIL 计算结果); 计算结果表明, 临时铁路栈桥结构的振动频率均能满足规范和列车运行速度  $V \leq 80 \text{ km/h}$  时的使用要求。

#### (4) 基坑开挖对临时铁路栈桥的位移影响分析

临时铁路栈桥在变形控制设计时, 需要考虑在挖深 10~22 m 的深大基坑开挖卸载状态下, 土体回弹以及深层土体位移引起的隆起影响, 此外还要叠加考虑栈桥在自重、道床荷载和列车荷载作用下栈桥结构自身的沉降变形影响。本文采用 plaxis 平面有限元分析软件, 建立平面有限元法数值模型, 分析基坑分层开挖卸载对上方临时铁路栈桥的附加变形影响。

围护及栈桥梁板柱结构均采用弹塑性三节点平面 BEAM 单元模式来模拟, 土体采用十五节点平面单元及硬化土(HS)材料模式来模拟。

图 8 为基坑分步开挖工况有限元模型, 图 9 为基坑开挖过程中基坑及栈桥位移等值云图, 图 10 为栈桥隆沉预测变形叠加曲线。

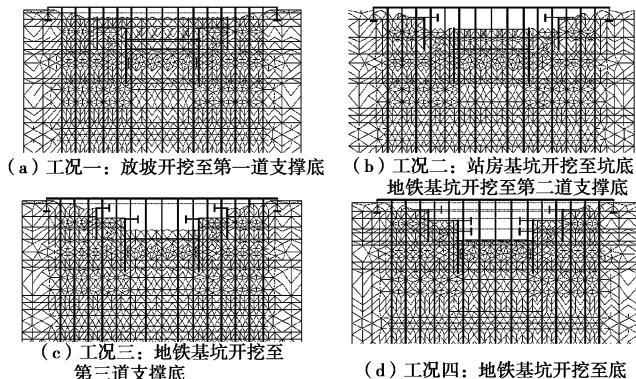


图 8 基坑分步开挖工况有限元模型

Fig. 8 Finite element models for each excavation condition

平面有限元数值分析结果表明, 随着基坑特别是中部地铁深基坑土方的分层开挖卸载, 引起坑内土体向上隆起变形, 带动临时铁路栈桥基础向上隆起。临时铁路栈桥在竖向荷载静力作用下跨中基础最大沉降量约为 -6.2 mm, 而基坑土方开挖卸载引起的隆起变形约为 26 mm, 栈桥最终变形表现为沿纵向呈开口向下抛物线形隆起。根据数值分析结果, 栈桥在竖向荷载静力作用下的沉降与基坑开挖卸载引起的隆起变形

叠加后, 临时铁路栈桥的隆起最大变形量约为 19.8 mm 左右, 相邻跨差异隆起量约为 1 mm 左右, 可满足列车运行速度  $V \leq 80 \text{ km/h}$  时的使用要求。

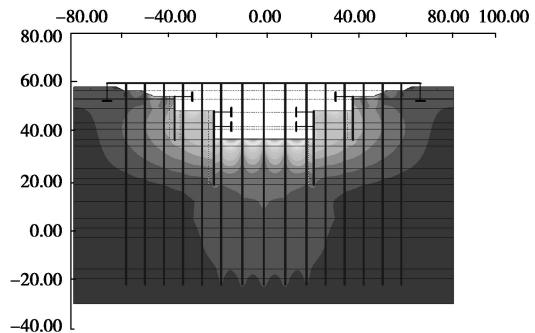


图 9 基坑开挖位移等值云图

Fig. 9 Displacements in excavation

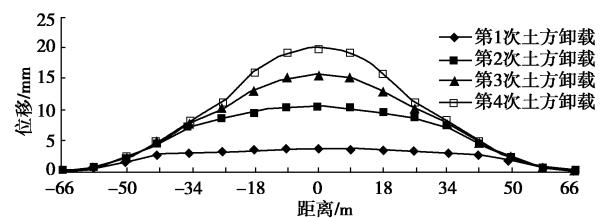


图 10 栈桥隆沉预测变形叠加曲线(向上为正)

Fig. 10 Superposition curves of settlement and bottom heave deformation of trestle bridges in excavation (positive value for upheaval)

## 2.2 软土深基坑上临时铁路栈桥的安全稳定控制要点及措施

临时铁路栈桥保护要求极高, 栈桥范围内土方开挖及支撑、底板施工需严格遵循“通车不动土, 动土不通车”的原则, 在保障铁路部门的列车营运前提下, 充分利用夜间列车调整停运的间断窗口时间进行施工, 施工作业时间短暂; 另外, 临时铁路栈桥的横向刚度较小, 开挖过程中其变形主要表现为纵向隆起、差异隆沉及列车运行时的横向振动。因此, 在软土深基坑栈桥上运行列车的安全稳定控制关键在于: 采取措施控制临时铁路栈桥的横向振幅、纵向隆起; 在有限的施工时间内, 提高栈桥保护范围内的施工效率, 精心组织施工, 分块、对称、平衡、限时开挖栈桥下土方, 及时形成各道支撑及圈梁, 尽早形成底板; 开挖过程中进行信息化监测、监控, 及时调整和优化下一步的施工参数。设计控制要求及措施如下:

### (1) 设置纵向及横向型钢剪刀撑

基坑开挖对临时铁路栈桥的动力特性影响分析计算表明, 栈桥型钢柱的横向刚度是整个栈桥刚度的控制因素, 因此设计时采取型钢柱间安装纵向及横向钢剪刀撑, 以加强型钢柱的刚度(特别是横向刚度), 确

保栈桥上列车运营的安全；另外，随着基坑土方分层开挖，每皮土方开挖完毕后及时安装柱间钢剪刀撑，弥补了因土方开挖引起的型钢柱刚度下降。

### (2) 临时铁路栈桥下软弱土体加固

本项目场地地表以下 2~18 m 范围内为高含水率、高压缩性、高强度的淤泥质粉质黏土层，因其具有较明显触变及流变特性，受扰动后土体强度极易降低，开挖过程中土体回弹量较大。设计在淤泥质粉质黏土层范围内采用三轴水泥土搅拌桩加固，提高土体强度，改良土性，以加强栈桥基础的弹性约束，并减少栈桥下土体开挖过程中的隆起变形。

### (3) 加深临时铁路栈桥立柱桩

临时铁路栈桥立柱桩采用  $\phi 1000$  直径钻孔灌注桩，桩端穿过土体深层回弹区嵌入圆砾层。在基坑开挖卸载过程中，对临时铁路栈桥起到一定拉结作用，有利于栈桥纵向隆起变形的控制，提高控制栈桥纵向隆起的安全度。

### (4) 钢格构柱耳板及剪刀撑的加工及安装

在本项目实施过程中，采取在钢格构柱上焊接加工好的钢耳板，耳板上预留螺栓孔，以适应钢格构柱施工偏转的各种情况；通过工艺试验制定施工控制参数，可保证钢耳板在允许进行型钢焊接的天窗时间（23:50~1:20）内完成；而钢剪刀撑可在白天通过螺栓与格构柱迅速安装，不影响栈桥及列车运营安全。

### (5) 临时铁路栈桥下土方开挖控制

栈桥下土方开挖严格按照“分块、对称、平衡、限时”的原则，开挖顺序纵向自栈桥中心向栈桥两端逐仓交替、南北对称开挖。开挖利用天窗及无动车时段（23:10~4:00）约 5 h 进行，每次开挖范围不大于 2 仓。

## 3 工程实施过程中的信息化控制及分析

### 3.1 信息化监测、监控

本基坑工程规模大、难度高，尤其临时铁路栈桥保护要求极高。为保证基坑开挖过程中临时铁路栈桥的安全稳定，需在基坑施工全过程跟踪施工活动，尤其是栈桥周边的施工活动。对临时铁路栈桥的变形及受力情况进行实时监测。因此，除了在基坑中布置常规的监测手段外，临时铁路栈桥上还布置了专门的信息化施工监测、监控措施。具体监测内容包括：栈桥立柱隆沉、栈桥三维变形、栈桥梁钢筋应力以及基坑开挖过程中栈桥的动力特性变化。通过这些监测，实时掌握和监控临时栈桥的变形、内力及动力特性变化情况，检验设计所采用的各种参数和假设的正确性；通过对实时监测结果（动态位移，加速度等）的分析，与理论计算结果进行比较，判别桥梁结构是否符

合设计要求，受力状态是否可控，安全是否可靠，以便及时调整和优化下一步的施工参数，确保临时铁路栈桥运营和基坑支护结构的安全。



图 11 现场施工情况

Fig. 11 Site photos

### 3.2 实施过程中的控制要求

基坑开挖过程中，在“要点施工、限时完工、逐仓开挖、及时加撑”的指导原则下，细化每层土方的分块、对称、限时开挖计划；确定详细的每日出土量、每仓土方开挖完成、剪刀撑安装完毕及支撑浇筑形成的时间节点等。通过科学严格的管理和分阶段控制，每皮土方开挖、剪刀撑安装及支撑浇筑的总时间可控制在 15 d 左右完成。快速高效的挖土、剪刀撑安装、支撑形成及底板浇筑提高了栈桥的整体刚度、缩短了基坑暴露时间，为铁路栈桥安全稳定和变形控制起到了重要作用。

### 3.3 工程实测变形及分析

宁波站临时铁路栈桥范围内基坑自 2012 年 3 月 4 日开始开挖，至 2012 年 6 月 7 日栈桥范围内底板浇筑完毕。在工程实施过程中，较好地控制了基坑支护结构的变形及对临时栈桥的影响，保证了沪深线的安全运营。以下结合监测数据对几项主要的控制指标进行总结分析。

表 2 为桥梁中跨分别在第一层、第二层、第三层、第四层土方开挖期间及底板施工完毕后实测的振幅和加速度幅值比较。

表 2 基坑开挖期间桥梁振幅和加速度幅值统计

Table 2 Amplitudes and accelerations of trestle bridge during excavation

土方	中跨振幅/mm		中跨加速度/(m·s <sup>-2</sup> )	
	竖向	横向	竖向	横向
第一层土方 开挖	0.60	0.19	0.40	0.38
第二层土方 开挖	0.31	0.08	0.32	0.57
第三层土方 开挖	0.82	0.09	0.33	0.64
第四层土方 开挖	1.44	0.08	0.34	0.79
底板施工完毕	1.31	0.12	0.37	0.71

表 3 为栈桥下基坑施工工况及栈桥预测及实测变

形统计。

表 3 栈桥下基坑施工工况及栈桥预测及实测变形统计  
Table 3 Actual and predicted deformations of trestle bridge during excavation

工况	横向位移/mm		隆起变形/mm		
	限值	实测	限值	实测	预测
第1道支撑施工		2.1		5.2	3.82
第2层土开挖及			1.8	8.4	10.57
第2道支撑施工					
第3层土开挖及	5	2.2	25	18.5	15.66
第3道支撑施工					
第4层土开挖及		2.7		24.5	19.84
底板施工					

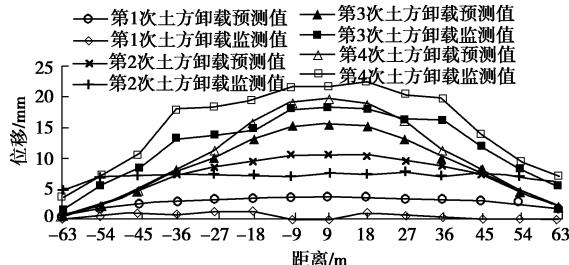


Fig. 12 Curve of heave deformation of trestle bridges in excavation (positive value for upheaval)

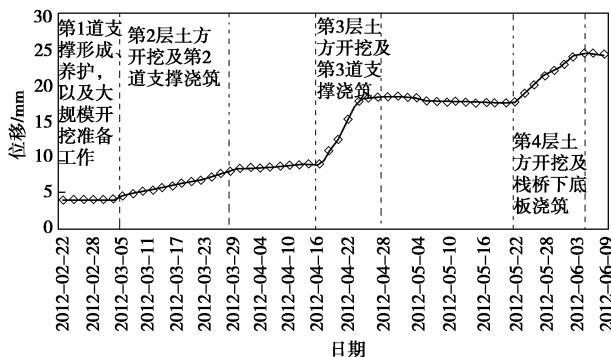


Fig. 13 Development speed of upheaval of trestle bridges

在宁波火车站基坑施工期间，每日通过基坑栈桥的各型列车有 100 多趟，其中以动车和普通客车为主。根据基坑开挖和栈桥的监测数据研究分析，可得出以下变形发展规律和结论：

(1) 在基坑开挖期间的每个阶段栈桥动位移和加速度幅值波动较大；但随着基坑开挖深度加深，对栈桥结构的动力特性（如振幅、加速度幅值等）影响逐渐增大，但对栈桥结构的受力状态影响不大。

(2) 由于采取了增设横向剪刀撑、钢格构柱通过钢筋砼圈梁与支撑体系连为整体等措施，并采用了直径  $\phi 1000$  的立柱桩，从而提高了栈桥的整体横向刚度；因此，底板浇筑完成后的最终横向位移控制在 3 mm 以内，达到了最初的设计要求。

(3) 随着栈桥下方基坑开挖土方卸载量的加大，栈桥的静态位移主要表现为栈桥桥面随着坑底土体隆起而向上隆起，最终的隆起量为 24.5 mm，略大于预测的 19.84 mm。通过将基坑栈桥桩基嵌固到坑底土层一定的深度，穿过土体深层回弹区，可将基坑开挖卸载引起土体回弹及隆起对栈桥的影响控制在容许和安全范围内。

(4) 对基坑和栈桥等的施工过程进行实时监测监控，并对实测结果进行分析，及时了解和掌握基坑的受力和变形状况；同时，根据监测数据对栈桥的变形情况进行反分析，从而提高了信息化监测、监控的精确度，控制基坑安全。

(5) 根据工程特点和场地土层特性采取有针对性的合理的加强和保护措施，可以有效的控制和减小基坑开挖对在基坑栈桥上运行铁路列车的不利影响。

## 4 结语

本文结合近年来承担设计的“改建铁路宁波站改造工程”，对我国软土地区铁路客站与换乘地铁等市政设施一体化建设过程中，为节省建设工期，同时保证原既有正线的正常运行以及深基坑开挖安全等疑难技术问题进行探索实践，研究提出并设计了在铁路站房与换乘地铁一体化开挖期间，深基坑栈桥上运行铁路列车的安全稳定应对控制措施，从而保证铁路客站与换乘地铁一体化建设实施的“多、快、好、省”。本文的研究成果及应对技术措施可为软土地区同类铁路客站建设的设计和施工提供借鉴和交流。

## 参考文献:

- [1] 贾 坚, 谢小林. 上海地下综合体的建造模式及沉降耦合控制[J]. 建筑结构, 2008, 38(9): 71 - 73. (JIA Jian, XIE Xiao-lin. The construction mode and settlement coordination of underground urban complex in Shanghai[J]. Building Structure, 2008, 38(9): 71 - 73. (in Chinese))
- [2] JG—120—99. 建筑基坑支护技术规程[S]. 1999. (JG—120—99 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. 1999. (in Chinese))
- [3] TB10002.1—2005 铁路桥涵设计基本规范 [S]. 2005. (TB10002.1—2005 Basic code for design of railway bridge and culvert[S]. 2005. (in Chinese))
- [4] 吴定俊, 李 奇, 宋郁民, 等. 宁波站铁路便桥车桥耦合振动研究[R]. 上海, 2010. (WU Ding-jun, LI Qi, SONG Yu-min, et al. Ningbo railway emergency bridge vehicle-bridge coupling vibration research[R]. Shanghai, 2010. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)