

# 盾构下穿时既有国铁站房的受力分析及加固方案

雷 崇 刁维科\*

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉//第一作者, 正高级工程师)

**摘 要** 合肥轨道交通1号线三期瑶海公园站—合肥站区间隧道正下穿未预留条件且经过两次改造的合肥站站房。为保证盾构顺利下穿,采用数值模拟计算,分别分析了站房基础存在既有沉降、站房无加固时由盾构下穿引起的站房基础沉降及站房上部结构内力变化、不同站房加固方案对应的结构内力变化等问题。研究结果表明:针对不同地层损失率,在站房无加固条件下,盾构隧道下穿会导致站房部分结构承载力不足;提出新增桩基+预应力梁的加固方案,经验算后证实变形及结构内力能满足要求。

**关键词** 盾构隧道;下穿施工;站房加固;受力分析

**中图分类号** U291.6<sup>+</sup>3

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2022.09.017

## Stress Analysis and Reinforcement Scheme of Shield Tunnel Under-passing Existing National Railway Station Building

LEI Chong, DIAO Wei-ke

**Abstract** The tunnel of Yaohai Park Station-Hefei Station interval of Hefei Rail Transit Line 1 under-passes Hefei Station building that has been reconstructed twice without reserved condition. To ensure successful under-passing of shield tunnel, numerical simulation is used to analyze problems including the existing settlement of the station building foundation, the settlement of the station building foundation caused by shield structure under-passing without building reinforcement, and the internal force change of building upper structure, structural internal force changes correspondent to different station building reinforcement schemes. Research results show that according to different stratum loss rates, under the condition of station building without reinforcement, the under-passing of shield tunnel will lead to insufficient bearing capacity of part of station building structure. Reinforcement scheme of new pile foundations + prestressed beams is proposed, and the deformation and structure internal force are verified to meet the requirements after verification calculation.

**Key words** shield tunnel; under-passing construction;

reinforcement of station building; stress analysis

**Author's address** China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China

随着城市轨道交通的快速发展,盾构隧道下穿既有建(构)筑物已成为城市建设中常见的工程问题。文献[1]以南昌地铁2号线下穿南昌火车站为例,通过有限元数值计算获得了站房结构易发生裂损区域,为后续相应工程提供了参考。文献[2]以广州地铁2号线下穿广州火车站站场为背景,采用地层加固及扣轨辅助方案,连续、安全、快速地穿过站场,具有重要的借鉴意义。文献[3]以贵阳轨道交通1号线下穿贵阳火车站售票厅及行包房工程为背景,通过数值计算方法对下穿段地应力及区间隧道开挖支护进行研究,并采取各种有效安全措施,保证了工程顺利实施。

以上成果对相关研究具有重要借鉴意义。但既有相关研究中针对盾构隧道正下穿国铁站房的相关研究相对较少。文献[4]以优化露空长度为目标,采用有限元软件对盾构隧道下穿站房基础等沉降规律进行了研究,并针对减少施工沉降问题提出了诸多优化方案,但其尚未介绍站房结构安全分析及相应的加固方案。为保证盾构隧道顺利下穿以及站房安全可靠,本文通过数值计算分析了站房基础存在既有沉降、站房无加固时,由盾构下穿引起的站房基础沉降及站房上部结构内力变化,以及不同站房加固方案对应的结构内力变化等问题;提出了新增桩基+预应力梁的加固方案,为后续类似工程提供一定的参考与借鉴。

## 1 工程概况

合肥轨道交通1号线三期工程起点为合肥站站,终点为天水路站,其中瑶海公园站—合肥站站区间

\* 通信作者

(以下简称“瑶合区间”)为单洞单线圆形隧道,采用盾构法施工,管片内径为 5.4 m,壁厚为 0.3 m。区间隧道覆土厚为 11.9~18.5 m,主要穿越硬塑黏土层,正下穿合肥站站房公共区,下穿距离约为 100 m。在隧道下穿及强影响范围内分布独立基础 32 座,人工挖孔扩底墩基 23 座,其相互关系如图 1 所示。

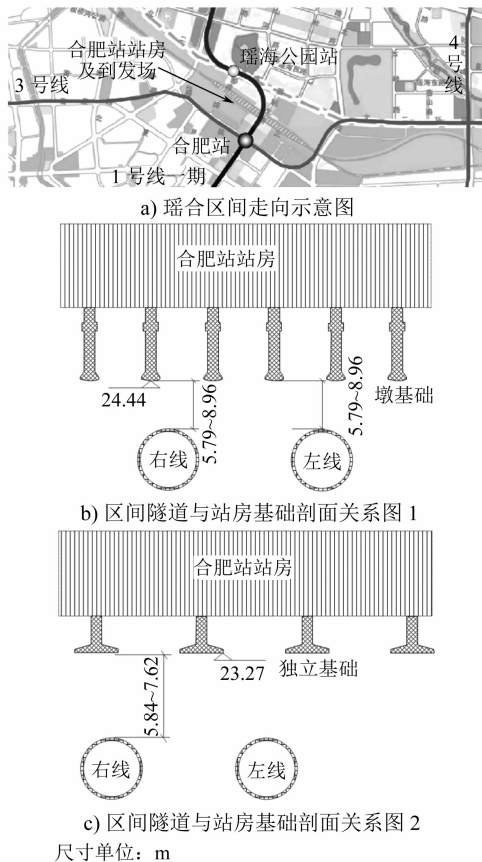


图 1 瑶合区间下穿工程概况图

Fig. 1 Overview of the Yao-He interval under-crossing project

合肥站为枢纽内主要客站,始建于 1997 年,站房为 2 层钢筋混凝土框架结构,主要为独立基础和局部墩基础,站房使用期间未进行沉降监测。2010 年对站房部分梁、板、柱等作无损切割、开洞、植筋、粘钢、混凝土封闭等综合处理;完成改扩建后,站房面积扩大 31%。2016 年站房再次改造时,将地面出站厅改造为地下出站,与南广场地下换乘厅顺接。

## 2 盾构下穿施工对既有国铁站房的影响

地层损失率是指盾构施工时,单位长度土体损失量与土体实际开挖体积的比值,综合反映盾构掘进时同步注浆的及时性和填充率,以及施工管理质量、技术水平、工艺等因素对地面沉降的影响<sup>[5]</sup>。在数值分析中,用地层损失率来模拟上述影响,以

体现不同的盾构施工水平。本文采用 MIDAS/GTS 软件对 3‰、4‰、5‰地层损失率盾构下穿引起的站房基础沉降进行计算分析。经试算,按 5‰地层损失率进行控制,站房基础沉降偏大,对应站房加固措施的工期、造价和影响较大,不满足实际要求;按 3‰地层损失率进行控制,站房加固的工期、造价和影响大大降低。考虑保留一定安全冗余,确保万无一失,本文重点分析 4‰地层损失率工况,其他两种工况作为类比进行对比分析。

### 2.1 建立模型

根据隧道与站房之间的相互关系,建立地层结构模型,模型尺寸为:130 m(长)×200 m(宽)×50 m(高),如图 2 所示。站房部分仅体现框架柱及其基础,将站房上部结构转化为集中荷载作用在框架柱顶。

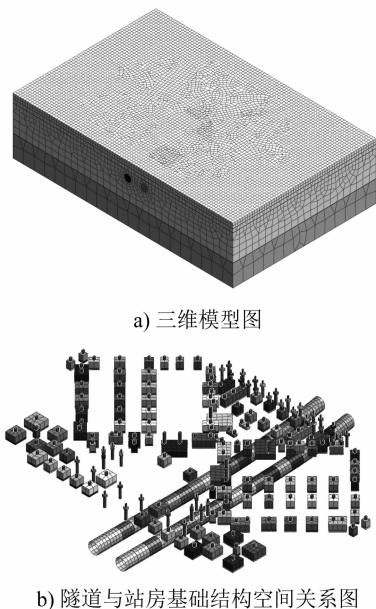


图 2 计算模型

Fig. 2 Computational model

### 2.2 材料参数

根据地勘报告及设计标准,确定相关参数如表 1 和表 2 所示。

### 2.3 计算分析

根据实际工程施工工序,模拟过程如下:

1) 设定边界及初始条件,计算初始应力平衡状态,模型位移清零。

2) 盾构作业主要步序:①开挖。通过“钝化”一个计算步长范围内的隧道土体单元模拟隧道开挖;②支护。开挖后,“激活”盾壳支护单元,同时给

表 1 土体计算参数

Tab. 1 Calculation parameters of soil mass

地层 代号	岩土 名称	重度/ (kN/m <sup>3</sup> )	土层厚/ m	无侧限抗压 强度/kPa	抗剪强度 凝聚力/kPa	直接剪切 内摩擦角/(°)	压缩模量/ MPa	静止 侧压力系数	基床系数/(MPa/m)	
									水平	垂直
①	素填土	18.0	1.6		10	8				
②	黏土	19.5	0.9	87.0	50	12	10	0.45	40	35
③	黏土	19.6	4.0	228.5	55	15	11	0.47	45	40
③ <sub>1</sub>	粉质黏土	20.0	16.5	180.0	35	12	10	0.47	38	35
⑥	全风化泥质砂岩	21.0	27.0		30	16	12	0.40	45	40

表 2 结构计算参数

Tab. 2 Calculation parameters of structure

类型	重度/(kN/m <sup>3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比
管片	25	34.500	0.18
钢筋混凝土	25	30.000	0.21
注浆层	25	0.156	0.33

开挖面施加面压力,以保持盾构开挖面的稳定;同时在盾尾“激活”一个管片长度的管片和等代层单元,以模拟盾构管片拼装及同步注浆过程;滞后 3 环管片,调整等代层参数模拟注浆材料硬化。③重复开挖、支护步序,直至完成整个盾构隧道的贯通。

2.4 结果分析

受篇幅限制,此处仅展示站房基础竖向位移。双线隧道贯通后站房基础沉降值如图 3 所示。由图 3 可知,双线隧道贯通后,站房基础最大沉降为 7.07 mm,发生在左右线中间且基底荷载大的基础上。地层损失率为 3‰、4‰和 5‰条件下的计算结果如表 3 所示。

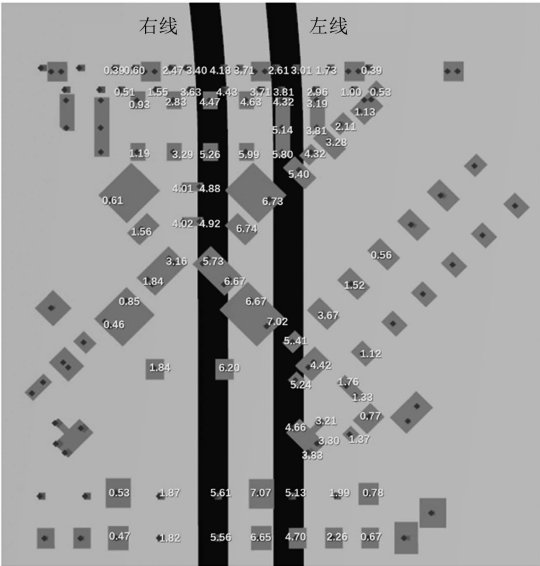


图 3 双线隧道贯通后站房基础沉降值

Fig. 3 Station building foundation settlement value of double track tunnel after penetration

表 3 不同地层损失率下隧道施工对站房基础影响统计表

Tab. 3 Statistics of influence of tunnel construction on station building foundation with different stratum loss rates

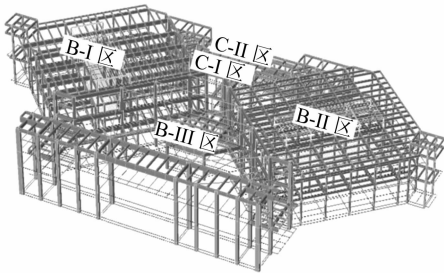
地层 损失率/ ‰	右线贯通最大变形		双线贯通最大变形		地面沉降/ mm
	基础沉降/ mm	基础水平 位移/mm	基础沉降/ mm	基础水平 位移/mm	
3	2.58	1.560	4.47	2.455	3.612
4	3.94	2.439	7.07	3.880	6.142
5	5.55	3.180	9.88	5.069	8.862

3 站房加固方案

3.1 建立模型

由于站房使用期间未进行沉降监测,采用分层总和法计算站房基础的既有沉降值,根据基底附加应力的不同,沉降计算深度影响范围为 7~13 m。计算结果表明,一般相邻柱间沉降差为 0~4 mm,局部大跨区域(24 m 跨)最大沉降差为 0~10 mm,既有沉降计算满足规范要求。

利用 YJK 软件建立合肥站站房主体结构的三维模型,如图 4 所示(不含站房独立基础)。输入前文计算的站房基础既有沉降与盾构下穿引起的附加沉降,计算站房结构内力变化,并研究相应加固方案。本文以 4‰地层损失率为例进行详细介绍,其他两种工况(3‰地层损失率和 5‰地层损失率)作为类比进行对比分析。



注: B、C——站房分区代号。

图 4 站房主体结构三维示意图

Fig. 4 3D schematic diagram of station building main structure

3.2 计算分析

合肥站为两层钢筋混凝土框架结构,按照最新规范校核,经过计算可知,站房上部结构较大范围出现构件承载力不足。B-Ⅲ区(标高 7.790 m)、B-Ⅱ区(标高 7.790 m)、C-I 区(标高 3.770 m、7.970 m、12.500 m)存在框架梁、柱配筋不足情况。以 B-Ⅲ区为例进行分析,对比配筋与原结构实际配筋计算结果(标高 7.970 m)如图 5 所示(本工程基于相对标高为零开展工作,对应吴淞高程绝对标高 30.400 m)。

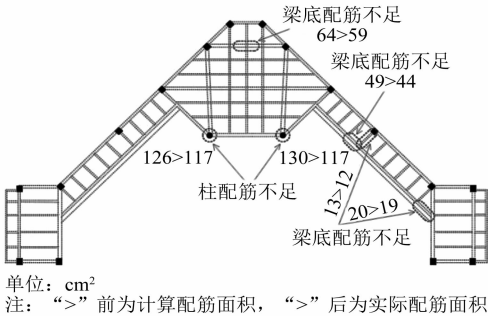


图 5 B-Ⅲ区计算配筋与原结构实际配筋对比(标高 7.970 m)  
Fig. 5 Comparison between the calculated reinforcement in zone B-Ⅲ and the actual reinforcement of original structure (elevation 7.970 m)

3.3 加固方案

针对站房上部结构的部分梁顶、梁底及柱出现配筋不足的情况,同时考虑到 B-Ⅱ区、C-I 区的梁柱构件在站改时已加固补强,无法二次加固提高构件承载力,经多次试算,本文提出采用桩基+预应力梁方案对部分沉降大的站房框架柱进行加固处理,将站房框架柱用预应力梁采取植筋的方式连接。梁高为 1 500~1 800 mm,梁宽为 900~2 000 mm,埋深为 0.2 m,采用 C40 混凝土;新增钻孔灌注桩桩径为 800 mm,单桩承载力特征值为 3 000 kN,桩端进入持力层不小于 1.0 m,如图 6 所示。地层损失率为 3‰、4‰和 5‰时,所

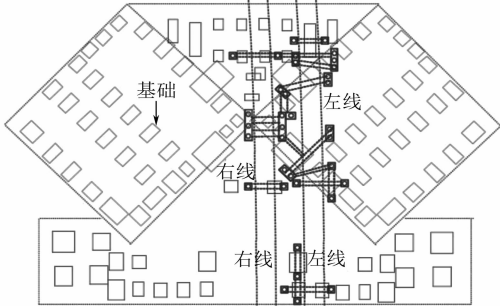


图 6 站房基础加固示意图

Fig. 6 Schematic diagram of station building foundation reinforcement

对应的站房加固方案如表 4 所示。

表 4 不同地层损失率下站房加固方案统计表

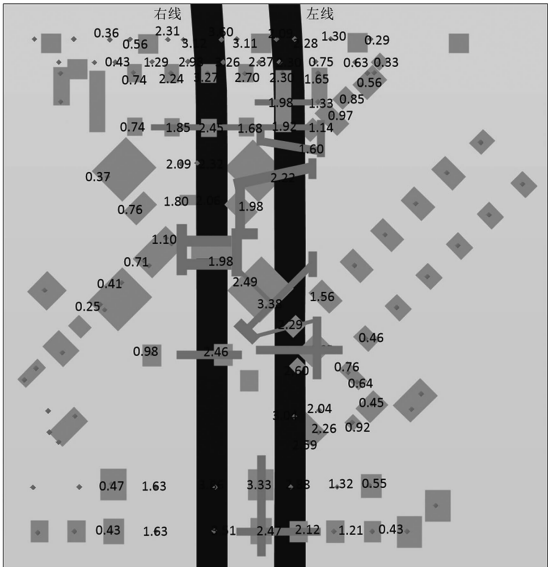
Tab. 4 Statistics of station building reinforcement schemes with different stratum loss rates

地层损失率/‰	加固方案	工期及影响分析
3	桩基+预应力梁:桩径 0.8 m,桩长 40 m,21 根桩,9 根预应力梁	加固施工时间短,封闭东侧站房
4	桩基+预应力梁:桩径 0.8 m,桩长 40 m,35 根桩,18 根预应力梁	加固施工时间适中,封闭东侧站房
5	桩基+筏板托换:桩径 1 m,桩长 40 m,89 根桩,筏板厚 1.5 m	加固施工时间长,封闭整个站房

3.4 加固方案验证

基于所提加固方案,采用 Plaxis 3D 软件对盾构下穿引起的站房基础沉降进行验证。以 4‰地层损失率为例进行详细介绍,其他两种工况(3‰地层损失率和 5‰地层损失率)作为类比进行对比分析。首先进行桩基施工(有钢护筒护壁,不考虑缩孔影响),然后进行梁(筏板)施工,最后进行盾构施工模拟。具体施工步骤为:①加固钻孔桩施工,②基坑开挖,③梁(筏板)施工及覆土回填,④~⑩右线盾构施工,⑪~⑰左线盾构施工。

计算模型与图 2 相似,此处不再赘述。考虑加固措施下的双线隧道贯通后站房基础沉降值如图 7 所示。由图 7 可知,考虑加固措施后,对站房上部结构内力影响较大的框架柱沉降得到明显抑制,同时



单位: mm

图 7 考虑加固措施下的双线隧道贯通后站房基础沉降值

Fig. 7 Foundation settlement value after double track tunnel penetration considering reinforcement measures

对附近的框架柱沉降也有改善,站房基础差异沉降满足  $0.001 L$  ( $L$  为相邻柱距) 的控制标准。对于部分跨度较大的转换梁,采用预应力起拱,以增加其刚度。此方法可精准将所加固的框架柱沉降控制在  $2\text{ mm}$  以内,可进一步确保站房结构的安全。

综合考虑站房基础既有沉降和盾构下穿引起的附加沉降,当地层损失率为  $4\text{‰}$  时,采用桩基+预应力梁的加固方案能确保站房结构安全,其相较于地层损失率为  $3\text{‰}$  的工况,保留了一定的安全冗余;其相较于地层损失率为  $5\text{‰}$  的工况,有效缩短了工期,降低了造价及对站房的影响。因此推荐  $4\text{‰}$  地层损失率工况的桩基+预应力梁加固方案。

## 4 结语

1) 盾构隧道正下穿及强影响范围内分布站房独立基础共 55 个,最小竖向净距仅为  $5.79\text{ m}$ ,站房使用期间没有沉降监测,站房健康状况未知,站房使用期间进行过 2 次改造,部分上部结构已进行过加固,无法通过二次加固提高其承载力,加固设计难度大,下穿施工风险高。

2) 将盾构施工对站房的影响分两部分进行分析,以地面为界,先分析站房基础的既有沉降及附加沉降,再分析基础沉降所引起的站房结构内力变化及其相应的加固措施,并获得相关结论。

3) 系统地分析了  $3\text{‰}$ 、 $4\text{‰}$ 、 $5\text{‰}$  这 3 种地层损失率工况下的站房加固方案,得出  $4\text{‰}$  地层损失率所对应的加固方案是合理可行的。在盾构施工期间,按  $3\text{‰}$  地层损失率进行施工控制,预留一定安全余量,确保站房安全万无一失。

4) 本工程为全国首例地铁区间盾构隧道近距离正下穿未预留条件的站房公共区,盾构下穿风险大、难度高。本文通过大量调研及严密分析论证,

创新性地提出采用桩+预应力梁的方式精准加固影响站房上部结构内力的主要框、架、柱等结构,在确保安全性与经济性的同时,有效降低对既有站房的影响,为类似工程提供借鉴与参考。

## 参考文献

- [1] 邹文浩,付兵先,马伟斌,等. 盾构隧道施工对火车站站房的影响分析[J]. 铁道建筑,2016(4):68.  
ZHOU Wenhao, FU Bingxian, MA Weibin, et al. Analysis on influence of shield-tunnelling on railway station building[J]. Railway Engineering, 2016(4):68.
- [2] 洪开荣. 盾构隧道穿越广州火车站站场的设计与施工[J]. 现代隧道技术,2002(6):34.  
HONG Kairong. Design and construction of shield driven tunnel crossing the station yard of Guangzhou Railway Station[J]. Modern Tunnelling Technology, 2002(6):34.
- [3] 王祥,陈发达,徐文,等. 轨道交通隧道下穿火车站施工安全影响及控制[J]. 土木工程与管理学报,2021(6):82.  
WANG Xiang, CHEN Fada, XU Wen, et al. Influence and control of construction safety of rail transit tunnel under a railway station[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2021(6):82.
- [4] 刘志涛,王立川,蒋岩松,等. 基于露空长度优化的盾构隧道下穿合肥火车站施工沉降控制探讨[J]. 隧道建设(中英文), 2021(增刊2):565.  
LIU Zhitao, WANG Lichuan, JIANG Kuisong, et al. Construction settlement control of shield tunnel crossing underneath Hefei Railway Station based on exposed length optimization[J]. Tunnel Construction, 2021(S2):565.
- [5] 吴昌胜,朱志铎. 不同隧道施工方法引起地层损失率的统计分析[J]. 浙江大学学报(工学版),2019(1):19.  
WU Changsheng, ZHU Zhiduo. Statistical analysis of ground loss ratio caused by different tunnel construction methods in China[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019(1):19.

(收稿日期:2022-05-25)

(上接第 84 页)

- [8] 詹炜,徐永能,王依兰. 城市轨道交通车辆智能化运维系统应用研究[J]. 城市公共交通,2018(12):98.  
ZHAN Wei, XU Yongneng, WANG Yilan. Application research on intelligent operation and maintenance system of urban rail transit vehicle[J]. Urban Public Transport, 2018(12):98.
- [9] 南宁轨道交通有限责任公司,城市轨道交通列车通信与运行控制国家工程实验室. 智能化运维白皮书[R]. 南宁:南宁轨道交通有限责任公司,城市轨道交通列车通信与运行控制国

家工程实验室,2020.

Nanning Rail Transit Co., Ltd., National Engineering Laboratory for Communication and Operation Control of Urban Rail Transit Trains. Intelligent operation and maintenance white paper[R]. Nanning: Nanning Rail Transit Co., Ltd., National Engineering Laboratory for Communication and Operation Control of Urban Rail Transit Trains, 2020.

(收稿日期:2020-07-09)