DOI：10.20271/j.cnki.1673-9833.2026.5002

暗挖隧道近距离斜下穿既有地铁车站的影响分析

晏俊杰[1,2]，祝　磊[2,3]，吴天祚[4]

（1. 安徽建筑大学 土木工程学院，安徽 合肥 230601；2. 合肥大学 城市建设与交通学院，安徽 合肥 230601；
3. 合肥大学 城市轨道交通安全与应急管理安徽省重点实验室，安徽 合肥 230601；
4. 中铁三局集团 华东建设有限公司，江苏 南京 211106）

摘　要：为了评估不同加固措施对地表、车站及隧道初期支护位移的控制效果，并验证综合加固方案的工程适用性，以合肥市地铁 8 号线暗挖隧道近距离斜下穿既有 3 号线一里井车站为工程背景，采用 MIDAS GTS NX 有限元软件对无加固、临时仰拱、注浆、锚杆及综合加固 5 种工况进行模拟。研究发现：无加固工况下，地表、车站及初期支护最大沉降分别为 21.31, 6.36, 16.21 mm，均超出规范限值。单一加固措施中，临时仰拱通过刚性支撑显著降低了三者沉降，降幅为 27.59%, 50.31%, 33.99%；注浆加固通过围岩改良抑制初期支护沉降为 24.55%，但对地表和车站控制效果有限（降幅小于 15%）；锚杆加固作用较弱（降幅小于 6%）。综合加固通过“刚性支撑－围岩改良－局部锚固”协同机制，分别将沉降降至 13.34, 2.15, 6.93 mm（降幅为 36.98%, 66.19%, 57.25%），均满足规范要求。实测数据与模拟结果吻合良好，验证了模型的可靠性及综合加固方案的可行性。

关键词：暗挖隧道；地铁车站；下穿；位移；数值模拟

中图分类号：U213　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1673-9833(2026)05-0010-09

引文格式：晏俊杰，祝　磊，吴天祚 . 暗挖隧道近距离斜下穿既有地铁车站的影响分析 [J]. 湖南工业大学学报，2026，40(5)：10-18.

Impact Analysis of Underground Tunnels Underpassing Subway Stations at a Close Distance Diagonally

YAN Junjie[1,2]，ZHU Lei[2,3]，WU Tianzuo[4]

（1. School of Civil Engineering，Anhui Jianzhu University，Hefei 230601，China；
2. School of Urban Construction and Transportation，Hefei University，Hefei 230601，China；
3. Anhui Provincial Key Laboratory of Urban Rail Transit Safety and Emergency Management，Hefei University，Hefei 230601，China；
4. East China Construction Co., Ltd., China Railway No.3 Engineering Group，Nanjing 211106，China）

Abstract：In order to evaluate the control effect of different reinforcement measures on the displacement of surface, station and tunnel initial support, and verify the engineering applicability of the comprehensive reinforcement scheme, taking the construction background of the underground tunnel of Hefei Metro Line 8, which underpasses the existing Line 3 Yilijing Station at a close distance diagonally. MIDAS GTS NX finite element software is used to simulate five working conditions: no reinforcement, temporary arch, grouting reinforcement, anchor rod and comprehensive reinforcement. The results indicate that under the unreinforced condition, the maximum settlements of the ground surface, station, and initial support reach 21.31, 6.36, 16.21 mm，respectively，all exceeding the specified

收稿日期：2025-05-13

基金项目：安徽省自然科学基金资助项目（2008085ME168）；安徽省重点研究与开发计划标准化专项基金资助项目（202004h7020002）

作者简介：晏俊杰，男，安徽建筑大学硕士生，主要研究方向为岩土工程，E-mail：2942822084@qq.com

通信作者：祝　磊，男，合肥大学教授，主要研究方向为岩土工程，E-mail：zhuleianhui@163.com

limits. Among single reinforcement measures，the temporary inverted arch significantly reduces settlements by 27.59%, 50.31%, 33.99% through rigid support; grouting reinforcement suppressed initial support settlement by 24.55% via surrounding rock improvement but shows limited effectiveness on the ground surface and stations (reductions <15%); bolt reinforcement exhibits minimal impact (reductions <6%). Through the collaborative mechanism of“rigid support surrounding rock improvement local anchoring”, the comprehensive reinforcement reduces the settlement to 13.34, 2.15, 6.93 mm respectively (with a reduction of 36.98%, 66.19%, 57.25%), all of which meet the requirements of the specifications. The measured data and simulation results show close agreement with simulation results, verifying the reliability of the model and the feasibility of the comprehensive reinforcement scheme.

Keywords：underground tunnel；subway station；underpassing；displacement；numerical simulation

0　引言

随着地下城市轨道交通的快速发展，新建地铁难免与既有地铁结构产生下穿关系。科学合理的加固方案对于控制地表沉降、既有车站及隧道结构形变具有关键作用。若新建暗挖隧道选用的加固方法不合理，则可能引发既有线路产生显著变形，进而危及轨道交通运营安全。因此，在不同加固方案下对近接斜交下穿工程开展数值模拟分析，对预测新建暗挖隧道施工引发的地表沉降、既有车站位移及隧道结构变形具有重要的工程实践价值。

国内外学者针对隧道下穿工程进行了广泛研究。在双线隧道开挖顺序方面，李志敏 [1] 借助 ABAQUS 软件，发现逐线开挖与双线同时开挖两种方案下的车站沉降差异不大；张社荣等 [2] 通过数值模拟，对隧道下穿工程的施工方案进行了比选，确定了双线先后开挖为最优方案。在施工方案比选方面，Huo R. K. 等 [3] 对比了全断面法、台阶法、CD（center diaphragm）法及侧壁导坑法对沈阳某地铁车站底板沉降的影响，证实 CD 法沉降控制效果最优；赵宏威 [4] 基于现场监测与有限元分析，验证了 CRD（cross diaphragm method）法可将地表和车站沉降控制在规范限值内；路开锋 [5] 通过数值模拟对比发现，在马蹄形断面隧道施工中，台阶法在经济性和工期控制方面比 CRD 法表现出显著优势。在加固措施方面，徐涛 [6] 发现注浆加固（降幅为 57.3%）对沉降的抑制效果要优于临时仰拱加固，且二者的组合措施满足限值要求；赵良云等 [7] 基于杭州某零距离下穿工程，发现全方位高压喷射注浆工法（metro jet system，MJS）加固对控制车站变形作用较好；张旭等 [8] 在北京地铁密贴下穿工程中采用初支注浆与千斤顶顶升的组合方案，成功将既有结构沉降控制在安全范围内；于军 [9] 研究发现，在隧道周边 2 m 范围进行全断面注浆并配合千斤顶反力支撑，可将既有结构沉降值控制在 3 mm 以内。在施工方案与加固措施比选方面，李雪等 [10] 通过对比 PBA 工法与双侧壁导坑法的差异，验证了前者结合管棚与全断面注浆的协同加固方案具有更优的沉降抑制作用；严德添 [11] 基于深圳某下穿工程，提出 CRD 工法配合隧道周边 2 m 范围全断面注浆，可有效约束车站结构变形。

尽管现有成果丰硕，但近距离斜下穿地铁车站的工程案例较少。多数文献聚焦于一种或两种加固工法，对临时仰拱、注浆及锚杆 3 种加固工况的组合效应缺乏量化分析。同时，鉴于隧道所处的中风化砂岩地层特性，不同的加固方式在不同地层中的效果也存在差异。本文以合肥市地铁 8 号线暗挖隧道下穿 3 号线既有一里井车站为背景，通过 MIDAS GTS NX 建立三维模型，系统对比了无加固、临时仰拱、注浆、锚杆及综合加固 5 种工况下“地表－车站－初支”的位移规律。通过对比实测数据与模拟结果，验证了综合加固方案对控制既有线变形的可行性，为类似下穿工程提供了理论支撑与实践参考。

1　工程背景

1.1　工程概况

合肥市轨道交通 8 号线一期工程与二期工程的衔接段位于一里井站南侧，衔接段左、右线长度均为 63.4 m，中心线间距 16 m，隧道覆土厚 18.8 ~ 19.0 m，需下穿已于 2019 年运营的轨道交通 3 号线一里井站，下穿角度为 8°，采用矿山法由一里井站向北一环站方向施工，起点里程左、右 DK24+890.022，终点里程左、右 DK24+826.622，隧道和车站相对位置平面图如图 1 所示，剖面图如图 2 所示。

由图 2 可知，一里井站 3 号线车站主体为地下双层两跨及三跨岛式站台车站，采用钢筋混凝土箱形框架结构，纵向标准柱跨为 9 m，覆土厚为 3.3~4.2 m，车站宽为 20.9 m，车站顶板、中板和底板厚度分别

为 0.9, 0.45, 1 m，左右边墙厚为 0.8 m，立柱长宽尺寸为 1.3 m × 0.9 m，沿车站纵向每 9 m 设置一根立柱，拱顶与车站底板间夹层土厚为 2.1 m，距车站底纵梁最小净距离为 0.982 m。

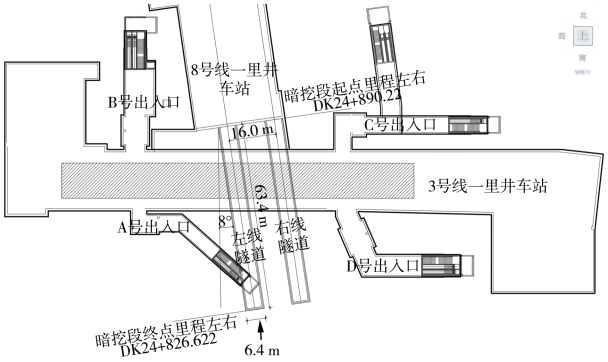
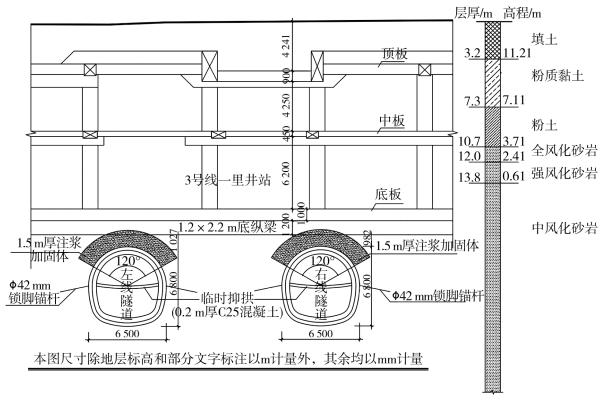
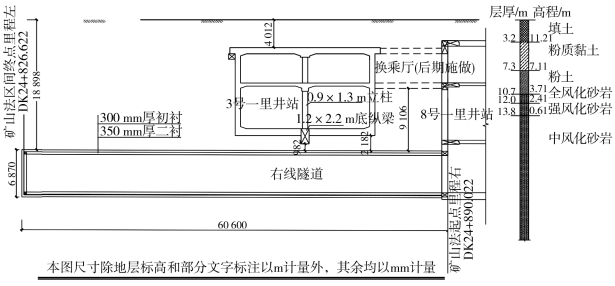


图 1 隧道和车站相对位置平面图

Fig. 1 Plan view of relative positions of tunnels and stations



a）正剖面图



b）侧剖面图

图 2 隧道和车站相对位置剖面图

Fig. 2 Cross-sectional view of tunnel and station relative position

该隧道采用马蹄形断面设计，施工工法选用台阶法，台阶间距 6 m。支护体系采用“仰拱 + 注浆 + 锚杆”综合加固方案：临时仰拱架设于隧道上下台阶之间，采用 0.2 m 厚 C25 混凝土浇筑；注浆加固采用钢花管在隧道拱顶 120° 范围内施作，形成 1.5 m 厚水泥砂浆层（配合比 $m_{水泥}:m_{砂}:m_{水}$=1:2:0.45）；锚杆加固系统采用 Φ42 mm 锁脚锚杆，单根长度为 3 m，外插角为 12°，沿隧道两侧按 0.5 m 间距布设。根据详勘报告可知，暗挖隧道完全位于中风化砂岩层（围岩等级Ⅴ级），岩体强度较高，岩芯较完整，围岩稳定性相对较好；地下水以基岩裂隙水为主，其富水性与透水性均较弱。初期支护净高约 6.2 m、净跨约 5.9 m，支护厚 300 mm；二次衬砌厚 350 mm，结构采用喷混凝土 + 格栅钢架组成的复合式衬砌体系。

1.2 模型建立

采用 MIDAS GTS NX 有限元分析软件，建立三维数值分析模型。模型的长 × 宽 × 高为 100 m × 80 m × 60 m。在模型计算过程中，修正摩尔 – 库仑本构模型，在保留摩尔 – 库仑理论框架的基础上，引入塑性变形机制和更多参数，提升了精细化工程分析的适用性。在本工程中，因地下结构复杂且开挖过程需高精度模拟，故选用修正模型能更真实反映土体实际力学响应。本模型假设土层呈水平层状分布，根据合肥市一里井站地质详勘报告，暗挖隧道地层以中风化砂岩为主，岩层产状平缓，无明显褶皱或断层发育，整体呈水平层状分布特征。同时，该区域土层在水平方向上的力学性质差异较小，符合均质化建模条件。根据地勘报告，隧道所处的中风化砂岩层富水性弱，基岩裂隙水以孤立赋存为主，未形成连续渗流场，施工时地下水对砂岩强度参数的影响可忽略。

针对车站主体结构、土体及注浆加固区域的建模，首先基于导入的封闭轮廓线扩展生成三维实体单元，通过切割操作实现结构分区划分；随后对分区后的实体进行网格划分，赋予相应材料属性；最终通过施工阶段定义与工况设置完成模型计算。对于初期支护与临时仰拱结构，采用二维板单元模拟方法，通过析取实体单元表面构建具有相应材料属性的二维网格体；而对于锚杆加固体系，则采用一维植入式桁架单元模拟，直接基于导入的框架线实现网格生成。既有车站结构和注浆加固的属性通过软件施工阶段中改变材料边界属性的功能来实现。基于圣维南原理，充分考虑边界效应的影响，计算时的边界条件如下：x 轴方向采用 x 向约束，y 轴方向采用 y 向约束，底部采用竖向约束，上表面为自由面。

建立的整体模型如图 3 所示，隧道和车站相对位置模型如图 4 所示。

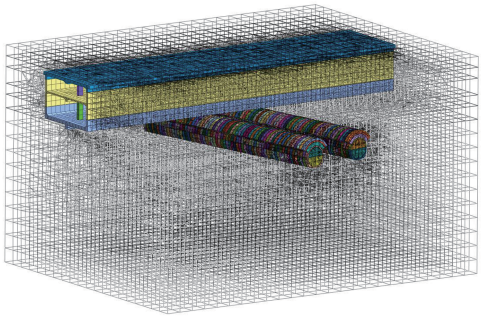


图 3 隧道和车站整体模型图

Fig. 3 Overall model diagram of tunnel and station

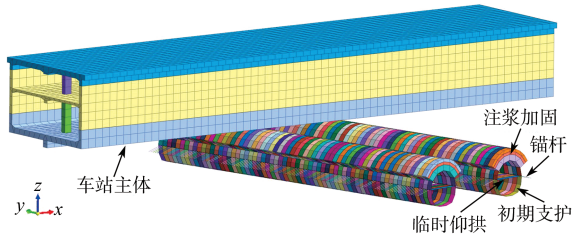


图 4　隧道和车站相对位置模型图

Fig. 4　Model diagram of relative positions of tunnel and station

1.3　模型参数

根据区域地质资料，一里井站地貌单元为河漫滩，场地地势平缓开阔，自然坡度为 3° ~5°，标高为 14.0~15.8 m。场地现主要为城市交通主要干道、居民住宅区，由于长期建设，原始地貌大部分已改变。根据地勘报告，模型的土层物理力学参数值和结构构件材料参数取值如表 1 和表 2 所示。

表 1　土层物理力学参数值

Table 1　Physical and mechanical parameters of soil layers

土层编号	土层名称	重度 / (kN·m^{-3})	抗剪强度		基床系数 / (MPa·m^{-1})		地基承载力 / kPa
			黏聚力 / kPa	内摩擦角 /(°)	水平	垂直	
（0）	人工填土	18.0	10	12	10	8	–
（1）1	粉质黏土	19.7	30	13	20	25	120
（1）2-1	粉土	20.1	16.7	23.3	25	25	130
（8）1	全风化泥质砂岩	20.0	30	16.1	39	43	250
（8）2	强风化泥质砂岩	23.4	100	25	200	200	400
（8）3	中风化泥质砂岩	25.7	300	31	250	300	800

表 2　结构构件材料参数取值

Table 2　Material parameters of structural components

结构构件		材料	容重 / (kN·m^{-3})	弹性模量 / MPa	泊松比
车站结构	梁、板、墙、二次衬砌	C35	25	3.15×10^4	0.2
	立柱	C50	25	3.45×10^4	0.2
锚杆		Q235B	78.5	206×10^3	0.3
初支、临时仰拱		C25	24	2.80×10^4	0.2
注浆加固		水泥砂浆	21	0.4×10^4	0.2

注：通过三轴压缩试验测得注浆加固材料 28 d 龄期试件的平均弹性模量为 3 960 MPa。

1.4　模型开挖过程

根据现场实际施工先后次序，矿山法段上下台阶法开挖分成 7 步进行模拟研究，具体开挖步骤如下。

第 1 步：通过钝化命令挖除既有车站对应土体，同时激活车站对应的混凝土属性，计算初始地应力，计算完成后初始位移清零；

第 2 步：逐步激活隧道左线上部注浆加固区的属性及边界条件，较暗挖隧道上半断面开挖提前一个施工步序，每 1 m 设置 1 个施工工序；

第 3 步：逐步开挖隧道左线上半断面，1 m 为 1 个施工工序，同时施作上部初支和临时仰拱，锚杆延后一步激活（无加固工况只施作初支）；

第 4 步：开挖隧道下半断面，同时施作下部初支，上下台阶间距 6 m；

第 5 步：隧道左线开挖完成；

第 6 步：拆除临时仰拱，隧道长度为 64 m，分 4 次拆除，每次拆除 16 m；

第 7 步：对隧道右线进行施工开挖，施工步骤和方法同左线，直至暗挖隧道全部施工完成。

说明：二次衬砌在隧道开挖完成后施作，对隧道及围岩影响很小，本次模拟不研究二次衬砌带来的影响。同时，在左线隧道完全贯通并完成初支、临时仰拱拆除后，再开始右线施工。左右线掌子面距离为全隧道长度（63.4 m），避免了双线同步开挖的叠加扰动。另外，既有车站底板与隧道拱顶最小净距仅 0.982 m，地质条件为中风化砂岩，V 级围岩，稳定性相对较好但需要支护。这种情况下，分步施工以逐步释放应力，减少对既有结构的影响：左线挖通后，地层会有一定的应力重新分布，形成一定的自稳能力，再进行右线施工，可减少右线开挖时的相互影响。

1.5　监测点布置和控制标准

1）车站监测点位设置。为了全面探究隧道开挖对既有车站沉降的具体影响，在车站横向沉降关键位置设置了 7 条监测线，分别为车站顶、中、底板的中线以及底板和边墙的上下行线，每个网格点处布置一个监测点，如图 5 所示。同时，根据现场监测点的布置，车站下层立柱底部位置的 11 个监测点具体位置和编号如图 6 所示。

2）变形控制标准。为确保下穿隧道施工期间邻近地铁车站的结构稳定性，合肥地铁运营部门明确规定既有车站位移限值为 ± 3 mm。

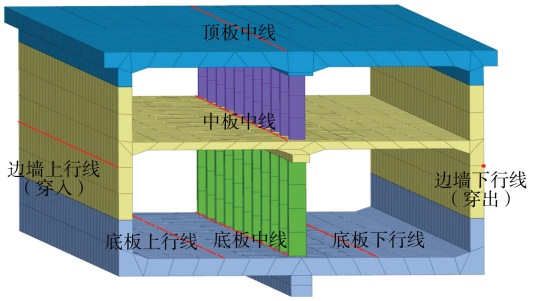


图 5　车站监测线布置图

Fig. 5　Layout of station monitoring lines

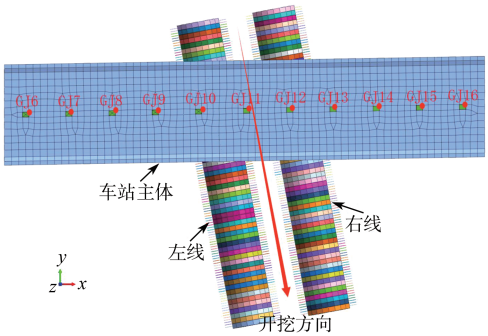


图 6 车站监测点布置图

Fig. 6 Layout of station monitoring points

根据《城市轨道交通工程监测技术规范》[12]，再结合合肥市该区域工程地质条件、隧道设计参数、工程监测等级及当地工程经验，确定矿山法隧道支护结构变形和地表沉降控制值如表 3 所示。

表 3 矿山法隧道支护结构变形和地表沉降监测项目控制值

Table 3 Control values for monitoring items of deformation in tunnel support structures and ground surface settlements using the mining method

监测项目	预警值 /mm	警戒值 /mm	控制值 /mm	变化速率 /(mm·d^{-1})
拱顶沉降	7	8	10	3
拱底隆起	7	8	10	2
地表沉降	14	16	20	3

3）加固工况。本工程按照设计图纸要求和以往下穿工程的加固方案经验，提出 4 种加固措施，共 5 种工况，具体方案如表 4 所示。

表 4 各工况具体施工方案

Table 4 Specific construction methods for each working condition

施工工况	施工方案	施工工况	施工方案
工况一	无加固	工况四	锚杆加固
工况二	仰拱内支撑	工况五	综合加固（仰拱内支撑 + 注浆加固 + 锚杆）
工况三	注浆加固		

2 结果与分析

2.1 地表沉降分析

施工结束后无加固工况地表整体沉降云图如图 7 所示。由图可知，沉降较大值主要分布于隧道纵轴线上方区域，尤其在穿越段与非穿越段交界区域表现显著。最大沉降值出现在暗挖隧道刚脱离穿越段的上方地表位置，沿隧道中心线向两侧延伸，沉降值呈现递减趋势；穿越段与非穿越段交界处存在明显沉降差。既有车站对应地表区域沉降量显著小于其他区域，呈现整体均匀沉降特征，这归因于既有车站较高刚度形成的隔离效应，其有效阻隔了暗挖隧道施工引发的上方土体扰动。当隧道穿越既有车站下方时，主要扰动发生于隧道与车站结构间土体，而车站上方土体受扰动程度较小，既有车站结构对控制其上方地表沉降具有积极作用。

其他各工况地表竖直沉降趋势和分布大致相同，故在此不列出；5 种工况下地表最大沉降量对比见表 5。

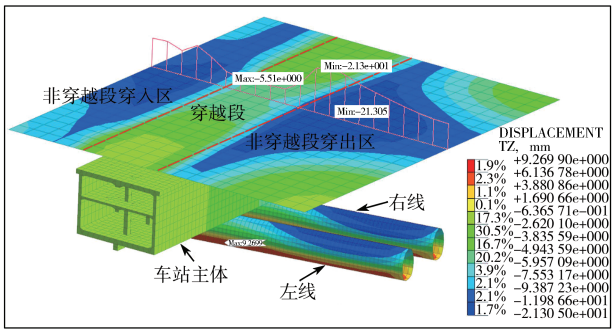


图 7 无加固工况地表沉降云图

Fig. 7 Ground surface settlement contour map for unreinforced condition

表 5 各工况地表最大沉降量对比

Table 5 Comparison of maximum ground surface settlements for each working condition

加固措施	地表沉降	
	最大沉降量 /mm	较无加固工况差值百分比 /%
无加固	21.31	–
仰拱内支撑	15.43	−27.59
注浆加固	19.29	−9.48
锚杆加固	20.64	−3.14
综合加固	13.34	−37.40

注：差值百分比 =（加固最值 − 无加固最值）/ 无加固最值，正为增幅，负为减幅。下同。

从表 5 可以看出，无加固工况下地表最大沉降值为 21.31 mm，临时仰拱、注浆加固、锚杆加固和综合加固的最大沉降值分别为 15.43, 19.29, 20.64, 13.34 mm，较无加固工况分别减少了 27.59%, 9.48%, 3.14%, 37.40%。单个加固措施中临时仰拱对控制地表沉降变形效果最明显，其次是注浆加固，锚杆加固对地表沉降的控制最弱。无加固和锚杆加固工况无法满足规范 20 mm 内的地表沉降要求，而临时仰拱、注浆加固和综合加固工况均满足规范要求。鉴于单一锚杆加固对暗挖隧道下穿施工诱发的地层扰动（地表位移量大于 20 mm）控制的局限性（降幅小于 5%），工程实践表明该工法不宜作为独立支护方案被应用于高扰动风险地层穿越工程。

2.2 车站主体结构沉降分析

施工结束后无加固工况车站结构位移云图如图 8 所示，车站顶、中、底板中线的竖直沉降以及底板上行线、中线、下行线和边墙的上、下行线各测点的最终沉降值曲线如图 9 所示，各工况车站最大沉降值对比如表 6 所示。

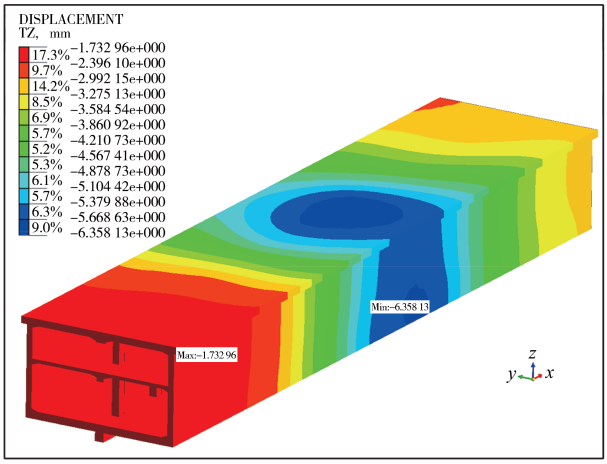
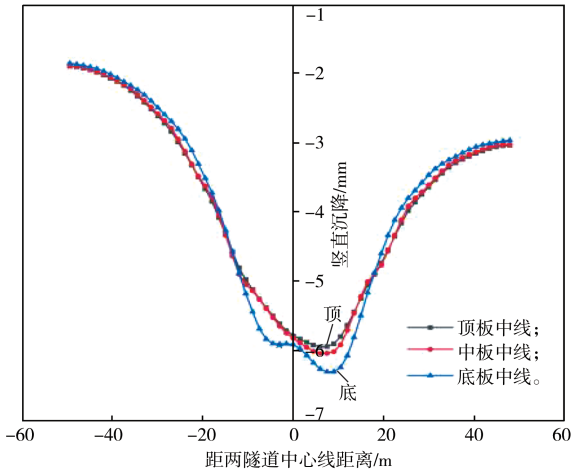
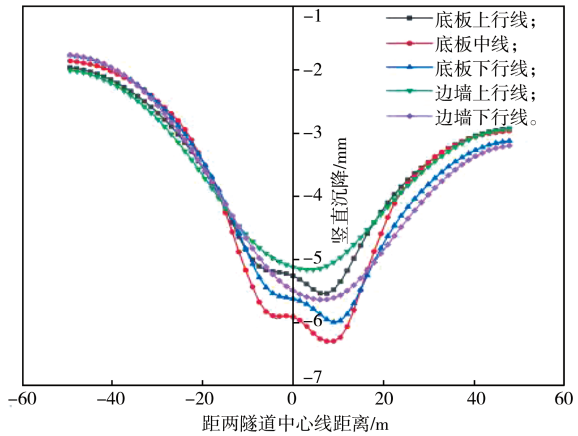


图 8　无加固工况车站位移云图

Fig. 8　Station displacement contour map for unreinforced condition



a）顶、中和底板中线



b）边墙和底板各测线

图 9　无加固工况车站各测线竖直沉降曲线图

Fig. 9　Vertical settlement curve graphs for each side line line under unreinforced conditions at the station

分析图 8 可知，车站主体沉降方面，隧道轴线正上方车站位置沉降值较大，沿隧道中心线向左右两侧呈逐步减小的趋势，最大沉降值为 6.36 mm，位于底板位置。由于非穿越段穿出区的距离比穿入区要长，隧道下穿对既有车站下半断面带来的扰动要比上半断面大，穿出段下边墙附近的沉降值要大于上边墙附近。

由图 9a 可知，隧道开挖对各板中线的影响程度由小到大排列序依次为顶板、中板、底板。距离暗挖隧道越近，影响程度越大。底板中线沉降槽呈“W”型，双线隧道叠加效应随着与拱顶距离增大而增强，顶板和中板中线沉降槽由底板的“W”型逐渐转为“V”型。最大沉降值均出现在右线隧道的正上方，顶板、中板和底板中线对应点的最大沉降值分别为 −5.94, −6.03, −6.30 mm。

由图 9b 可知，隧道开挖对底板和边墙各测线的影响程度由小到大排序依次为边墙上行线、底板上行线、边墙下行线、底板下行线、底板中线。沉降槽形态方面，底板各测线主要呈“W”型分布，边墙各测线则呈“V”型分布。受空间位置影响，右线初始洞口距车站较左线远，致使其开挖对车站的扰动要高于左线。各监测线对应点最大沉降值依次为 −5.16 mm（边墙上行线）、−5.54 mm（底板上行线）、−5.64 mm（边墙下行线）、−5.99 mm（底板下行线）及 −6.30 mm（底板中线），无加固工况下车站最大沉降值均超出 3 mm 控制标准。

表 6　各工况下既有车站最大沉降量对比

Table 6　Comparison of maximum settlements at existing stations under different conditions

加固措施	左线施工完成		双线施工完成	
	最大沉降量 /mm	较无加固工况差值百分比 /%	最大沉降量 /mm	较无加固差值百分比 /%
无加固	4.08	–	6.36	–
仰拱内支撑	2.08	−49.02	3.16	−50.31
注浆加固	3.15	−22.79	5.43	−14.62
锚杆加固	3.88	−4.90	6.03	−5.19
综合加固	1.45	−64.46	2.15	−66.19

从表 6 可以看出，左线施工完成时各工况最大沉降值分别为 4.08 mm（无加固）、2.08 mm（仰拱）、3.15 mm（注浆）、3.88 mm（锚杆）及 1.45 mm（综合），相比无加固工况，各加固工况对应降幅分别为 49.02%, 22.79%, 4.90%, 64.46%；至双线贯通阶段，沉降极值进一步发展为 6.36 mm（无加固）、3.16 mm（仰拱）、5.43 mm（注浆）、6.03 mm（锚杆）及 2.15 mm（综合），降幅分别达 50.31%, 14.62%, 5.19%, 66.19%。研究表明，仰拱内支撑通过有效分担围岩压力，成为单一措施中沉降控制最优方案（降幅大于 50%），注浆加固则通过浆液渗透改善围岩刚度实现次优控制（降幅为 14.62%），而锚杆加固控制效果较弱（降幅小于 6%）。

综上可知，唯有综合加固方案通过多措施协同作用，将最终沉降值控制在 2.15 mm，满足规范限值（3 mm），验证了“刚性支撑－围岩改良－局部锚固”联合控制体系的有效性。

2.3 初期支护位移分析

双线开挖完成时，隧道初支位移云图如图 10 所示；双线贯通时，各工况左线初支拱顶和拱底的最终位移曲线如图 11 所示；各工况隧道初支最大沉降值和隆起值对比如表 7 所示。

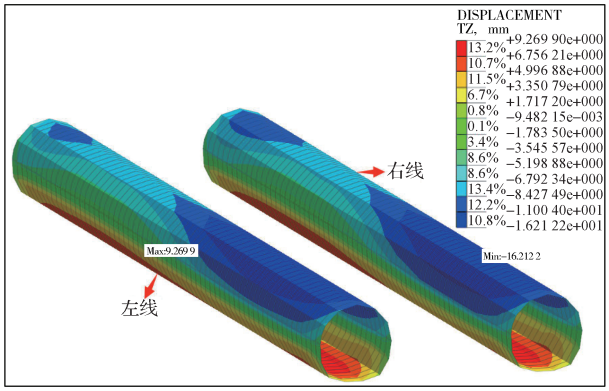
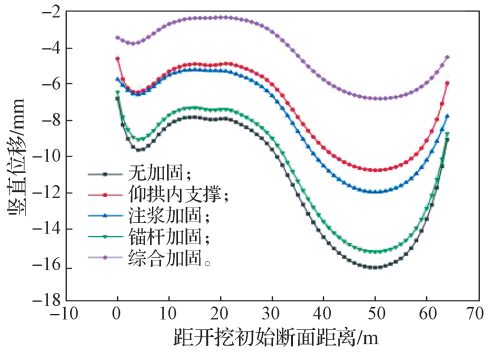
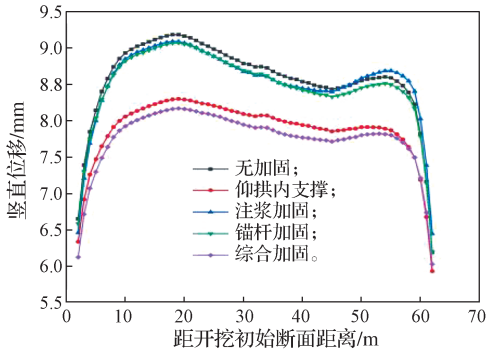


图 10 无加固工况初支位移云图

Fig. 10 Displacement contour map of initial support under unreinforced conditions



a）左线拱顶



b）左线拱底

图 11 各工况下左线隧道拱顶和拱底位移曲线图

Fig 11 Displacement curve graphs of initial support for the left line under various reinforced conditions

通过图 10 和图 11 可知，隧道拱顶区域呈现显著沉降特征，而拱底则以隆起位移为主。值得注意的是，既有车站通过分担上部土体压力有效降低了拱顶沉降量，穿越段拱顶沉降较非穿越段整体偏小，但对拱底位移的抑制作用不显著。位移分布特征显示：隧道开挖初始断面附近初期支护位移值较小，拱底各点隆起值差异不明显，拱顶最大沉降值出现在非穿越段穿出区中间位置。图 10 中数值表明：无加固工况下，双线贯通后隧道最大隆起值为 9.27 mm，满足 10 mm 规范限值；但最大沉降值为 16.21 mm，已超出控制标准，需优化施工工艺或加强支护措施以控制沉降风险。

表 7 各工况隧道初支最大沉降和隆起值对比

Table 7 Comparison of maximum settlement and heave of tunnel initial support under various working conditions

加固措施	沉降值		隆起值	
	最大沉降量 /mm	较无加固工况差值百分比 /%	最大隆起量 /mm	较无加固工况差值百分比 /%
无加固	16.21	−	9.27	−
仰拱内支撑	10.70	−33.99	8.40	−9.38
注浆加固	12.23	−24.55	9.29	0.22
锚杆加固	15.43	−4.81	9.15	−1.29
综合加固	6.93	−57.25	8.30	−10.46

从表 7 可知，双线贯通时，各工况隧道最大沉降值依次为 16.21 mm（无加固）、10.70 mm（仰拱）、12.23 mm（注浆）、15.43 mm（锚杆）及 6.93 mm（综合），较无加固工况沉降降幅分别为 33.99%, 24.55%, 4.81%, 57.25%；隧道拱底最大隆起值分别为 9.27 mm（无加固）、8.40 mm（仰拱）、9.29 mm（注浆）、9.15 mm（锚杆）及 8.30 mm（综合），对应隆起降幅为 9.38%, −0.22%, 1.29%, 10.46%。可以看出，上部注浆与仰拱内支撑对隧道拱顶沉降均具有显著的抑制作用，各加固工况对拱顶沉降的控制效果显著优于其对拱底隆起的抑制效果。对于隧道拱底隆起的控制，在单一加固工况中，除仰拱内支撑表现出一定效果外（降幅为 9.38%），其余工况作用均不显著（降幅小于 2%）。

综上，各工况隧道隆起值均满足在 10 mm 规范限值内，而沉降值仅综合加固工况符合 10 mm 控制标准。数值模拟结果进一步验证了“仰拱＋注浆＋锚杆”的综合加固方案在沉降控制方面的有效性及工程必要性。

2.4 模拟结果和实测值对比分析

图 12 为双线隧道贯通时车站底板中线各点对应模拟沉降值与实测值（监测点 GJ6-GJ16）的对比曲线图。由图可知：模拟值与实测值的沉降趋势基本

一致，沉降曲线呈现“W”型双峰沉降槽分布特征，存在两个极大值点，分别位于双线隧道轴线的正上方。车站最大监测沉降值为 2.18 mm（GJ12 监测点），该点位于右线隧道正上方，对应模拟沉降值为 2.12 mm；实测最大值与模拟值均满足 3 mm 的规范限值要求。模拟数据与实测结果吻合良好，证明本次下穿工程的施工可行性及结构安全性，同时验证了综合加固措施的有效性。

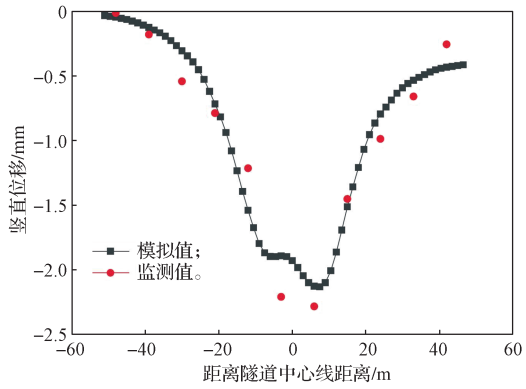


图 12　底板中线模拟沉降值和实测值对比

Fig. 12　Comparison of simulated and measured settlements at floor slab centerline

3　结论

本文以合肥市地铁 8 号线暗挖隧道下穿既有 3 号线一里井车站为背景，采用 MIDAS GTS NX 有限元软件对工程进行模拟，对无加固、临时仰拱、注浆加固、锚杆加固和综合加固 5 种工况下的地表、车站以及隧道初支的位移进行了对比分析。通过将车站结构的数值模拟结果与现场监测数据进行对比验证，得出以下结论：

1）无加固工况下地表最大沉降量为 21.31 mm，超出 20 mm 规范限值。单一加固措施中，临时仰拱通过刚性支护作用显著降低沉降量 27.59%（15.43 mm），注浆加固通过围岩改良减少沉降量 9.48%（19.29 mm），而锚杆加固效果较弱（降幅为 3.14%，20.64 mm）。综合加固通过“刚性支撑－围岩改良－局部锚固”协同作用实现了 36.98% 的降幅（13.34 mm），满足规范要求。

2）车站底板中线沉降呈“W”型双峰沉降槽分布，无加固工况最大沉降（6.36 mm）位于右线隧道正上方底板位置。单一加固中，临时仰拱通过分担围岩荷载显著抑制沉降（降幅为 50.31%，沉降量为 3.16 mm），注浆加固次之（降幅为 14.62%，沉降量为 5.43 mm），锚杆加固作用有限（降幅为 5.19%，沉降量为 6.03 mm）。综合加固将沉降降至 2.15 mm（降幅为 66.19%），满足 3.00 mm 限值之内。

3）无加固工况初支最大沉降（16.21 mm）超出 10 mm 限值。临时仰拱和注浆加固沉降分别降低 33.99%（10.70 mm）与 24.55%（12.23 mm），而综合加固（6.93 mm，降幅 57.25%）满足规范要求。拱底隆起受加固措施影响较小，但均满足 10 mm 的规范要求，综合加固最大降幅为 10.46%（8.30 mm）。

4）单一加固中，临时仰拱对车站沉降控制最优（降幅为 50.31%），注浆加固侧重抑制拱顶变形（降幅为 24.55%），锚杆加固作用较弱（降幅小于 6%）。综合加固通过多措施协同，实现地表、车站及初支沉降降幅为 36.98%（13.34 mm），66.19%（2.15 mm），57.25%（6.93 mm），三者均满足规范要求。车站模拟值与实测值沉降曲线吻合较好，最大沉降值监测点 GJ12 实测值（2.18 mm）与模拟值（2.12 mm）误差较小，且均满足规范要求，验证了数值模拟的可靠性和综合加固方案的可行性，为中风化砂岩地层近接施工工程提供了一定参考。

参考文献：

[1] 李志敏 . 地铁隧道下穿施工对既有地铁车站及高架桩基的影响分析 [J]. 城市轨道交通研究，2024，27(6)：185−190, 195.
LI Zhimin. Influence Analysis of Metro Tunnel Under-Ground Construction on Existing Metro Sta-Tion and Viaduct Pile Foundation[J]. Urban Mass Transit，2024，27(6)：185−190, 195.

[2] 张社荣，王振振，王世强，等 . 双线隧道零距离下穿既有地铁车站暗挖施工方案研究 [J]. 城市轨道交通研究，2018，21(9)：132−134.
ZHANG Sherong，WANG Zhenzhen，WANG Shiqiang，et al. Research on Double-Line Tunnel Very Close Undercrossing the Existing Subway Station[J]. Urban Mass Transit，2018，21(9)：132−134.

[3] HUO R K，ZHOU P Y，SONG Z P，et al. Study on the Settlement of Large-Span Metro Station’s Baseplate Caused by the Tunnels Newly Built Beneath It[J]. Advances in Mechanical Engineering，2019，11(2)：1687814018825161.

[4] 赵宏威 . 地铁隧道零距离下穿既有车站施工沉降控制研究 [J]. 施工技术，2017，46（增刊 1）：809−812.
ZHAO Hongwei. Study on Construction Subsidence Control of Metro Tunnel Passing Through Existing Station at Zero Distance[J]. Construction Technology，2017，46(S1)：809−812.

[5] 路开锋 . 北京新建地铁工程穿越既有线方案及暗挖工法研究 [D]. 北京：清华大学，2013.

LU Kaifeng. Research on the Plans and Construction Methods of the New-Built Subway Works Passing Under the Existing Subways[D]. Beijing：Tsinghua University，2013.

[6] 徐 涛 . 矿山法地铁区间隧道切桩密接下穿既有地铁车站的施工沉降监测及控制措施 [J]. 城市轨道交通研究，2024，27(6)：142−147.
XU Tao. Construction Settlement Monitoring and Control Measures for Mining Method Tunnel Section by Cutting Piles Closely Under-Passing Existing Metro Station[J]. Urban Mass Transit，2024，27(6)：142−147.

[7] 赵良云，张运涛 . 暗挖隧道下穿既有地铁站变形控制及影响分析 [J]. 西安科技大学学报，2020，40(5)：878−886.
ZHAO Liangyun，ZHANG Yuntao. Deformation Control and Influence Analysis of Underground Tunnel Passing Through Existing Subway Station[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology，2020，40(5)：878−886.

[8] 张 旭，张成平，韩凯航，等 . 隧道下穿既有地铁车站施工结构沉降控制案例研究 [J]. 岩土工程学报，2017，39(4)：759−766.
ZHANG Xu，ZHANG Chengping，HAN Kaihang，et al. Case Study of Control Technology of Structural Settlements Due to Tunnelling Beneath a Subway Station[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2017，39(4)：759−766.

[9] 于 军 . 浅埋暗挖隧道零距离下穿既有地铁车站施工方案优化研究 [J]. 隧道建设，2013(1)：22−26.
YU Jun. Study on Construction Scheme Optimization of Shallow-Buried Tunnel Undercrossing Existing Metro Station with Zero-Clearance[J]. Tunnel Construction，2013(1)：22−26.

[10] 李 雪，陈 霖，赵卫星，等 . 暗挖隧道下穿既有地铁线路变形控制对比研究 [J]. 建筑结构，2023，53(增刊 2)：2709−2714.
LI Xue，CHEN Lin，ZHAO Weixing，et al. Comparative Study on Deformation Control of Excavated Tunnel Underpassing Existing Subway Line[J]. Building Structure，2023，53(S2)：2709−2714.

[11] 严德添 . 暗挖隧道近距离下穿既有地铁车站的影响与控制技术研究 [D]. 成都：西南交通大学，2018.
YAN Detian. Study on Impact and Control Technology of Bored Tunnel Undercrossing the Existing Subway Station at Short Range[D]. Chengdu：Southwest Jiaotong University，2018.

[12] 中华人民共和国住房和城乡建设部 . 城市轨道交通工程监测技术规范：GB 50911—2013[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2014：15−20.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for Monitoring Measurement of Urban Rail Transit Engineering：GB 50911—2013[S]. Beijing：China Architecture & Building Press，2014：15−20.

（责任编辑：姜利民）