

麻凤海,张雨.上软下硬地层大跨暗挖地铁车站拱盖法施工力学效应研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(1):52-61.doi:10.11956/j.issn.1008-0562.20230541

MA Fenghai,ZHANG Yu.Study on construction mechanics effect of arch cover method for underground subway station with upper soft and lower hard strata[J].Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2025,44(1):52-61.doi:10.11956/j.issn.1008-0562.20230541

# 上软下硬地层大跨暗挖地铁车站拱盖法施工力学效应研究

麻凤海,张雨\*

(大连大学建筑工程学院,辽宁大连116622)

**摘要:**为研究上软下硬地层大跨暗挖地铁车站拱盖法施工的力学效应,以大连地铁4号线东南山站为研究背景,采用数值模拟和现场监测相结合的方法,运用MIDAS-GTS/NX有限元软件,研究地铁车站拱盖法施工全程的围岩变形及稳定性并与现场实测数据对比分析。研究表明:地表沉降由车站中线向两侧逐渐递减,影响区域约为车站开挖跨度的2倍;围岩变形和应力具有明显对称性,拱部围岩以沉降为主,高边墙以隆起为主,拱部跨中向隧道净空入侵,大拱脚向围岩入侵;围岩最大主应力均为压应力,拱脚尖角部位存在应力集中现象;围岩塑性区作用位置随车站施工不断变化,最终集中作用于高边墙位置处;通过Peck公式预测地表沉降,验证在上软下硬地层中采用拱盖法施工的可行性,为实际工程施工提供参考。

**关键词:**暗挖地铁车站;拱盖法施工;围岩变形;Peck沉降预测;围岩塑性区;围岩最大主应力

中图分类号:TU94

文献标志码:A

文章编号:1008-0562(2025)01-0052-10

## Study on construction mechanics effect of arch cover method for underground subway station with upper soft and lower hard strata

MA Fenghai, ZHANG Yu\*

(School of Architectural Engineering, Dalian University, Dalian 116622, China)

**Abstract:** To study the mechanical effects of the arch cover method in the construction of large-span underground subway station with upper soft and lower hard excavation, taking the construction of Southeast Mountain Station on Dalian Metro Line 4 as the research background, a research method adjoining numerical simulation and on-site monitoring was adopted. MIDAS-GTS/NX finite element software was used to study deformation and stability of surrounding rock and contrastive analysis with on-site measured data. The research results indicate that surface subsidence shows a decreasing trend from the centerline of the station to both sides, and the affected region is about twice the excavation skip distance of the station. The variant and stress of country rock have apparent symmetrical characteristics, the surrounding rock of the arch is mainly caused by settlement, while the high side wall is mainly uplift, the arch spans invades towards the tunnel clearance, the large arch foot invades towards the surrounding rock; the von mises stress of the country rock is under compression, and there is a phenomenon of concentration of stresses at the closed angle of the arch foot; the location of the plastic region of the country rock change continuously with the build of the depot, and ultimately funnel into the high side walls. The verification of surface settlement is predicted using the Peck formula, and the feasibility of using the arch cover method for construction in upper soft and lower hard strata is verified, which provides a reference for similar practical projects.

**Key words:** underground of subway station; arch cover method construction; surrounding rock deformation; Peck settlement prediction; plastic zone of surrounding rock; maximum principal stress of surrounding rock

收稿日期:2023-12-20 修回日期:2024-03-08 接受日期:2024-03-25 责任编辑:黄琦

基金项目:国家自然科学基金项目(51474045);大连市科技创新基金项目(2023JJ12GX012)

作者简介:麻凤海(1964-),男,吉林九台人,博士,教授,主要从事煤矿岩层移动理论和地表沉降方面的研究。E-mail:3807035077@qq.com

通信作者:张雨(1999-),女,湖北广水人,硕士,主要从事工程地质和岩土工程方面的研究。E-mail:512007494@qq.com

## 0 引言

随着经济社会的不断发展,地上空间资源日渐稀缺,对地下空间资源的开发利用已成为必然选择。地铁车站的施工多位于城市中心地段,过往行人较多,建筑群密集,交通网错综复杂,因此,有学者提出适用于地下大跨浅埋暗挖的地铁车站施工理论。大跨暗挖地铁车站施工工法主要有中洞法、洞桩法、双侧壁导坑法、CRD交叉中隔墙法<sup>[1-4]</sup>等。上海和广州等地地铁车站施工大部分采用双侧壁导坑法和CRD法,北京地铁车站施工常采用PBA法和中洞法<sup>[5-8]</sup>。随着城市地下交通轨道的建设与发展,大跨度浅埋暗挖地铁车站施工工法也取得了一系列创新成果,针对上软下硬复合地层这一特殊地质条件,相关人员提出一种新型工法,即拱盖法<sup>[9-10]</sup>,该工法可以较好地解决钻爆法施工引起的安全性不足和变形量较大等问题。

魏志远等<sup>[11]</sup>通过FLAC<sup>3D</sup>有限元软件研究了双层初期支护拱盖法施工时拆除临时支撑的力学效应,研究表明双层拱盖体系协同工作能有效抑制地表沉降和围岩变形。LIU等<sup>[12]</sup>通过研究拱盖法施工边桩的力学效应,以边桩直径、间距、埋深为研究指标,通过现场实测和数值模拟发现桩径是控制边桩变形的关键。龚旭东<sup>[13]</sup>通过MIDAS-GTS/NX软件模拟地铁车站初支拱盖法施工全过程,得到沉降变形规律并提出相应的施工优化措施。SHANG等<sup>[14]</sup>通过对比六种不同的支护组合对围岩变形控制效果的影响,发现采用双层初支叠合大拱脚支护方案对围岩变形的抑制效果最佳。孔超等<sup>[15]</sup>通过室内模型试验研究不同施工工况下初支拱盖法施工过程中围岩的变形规律,研究表明拱盖能有效抑制围岩及初支变形。LIU等<sup>[16]</sup>研究了拱盖法施工过程中支护结构的受力特征,研究表明影响拱盖法支撑结构的关键是车站中板的施工和混凝土的回填。GUO等<sup>[17]</sup>研究发现双层拱盖法能够在临时支撑拆除阶段提供更大的安全储备,有利于抑制拱形结构变形,减小地表沉降,提高结构的安全性和稳定性。WANG等<sup>[18]</sup>通过双侧壁导坑法、初支拱盖法数值分析以及现场监测,发现初支拱盖法更有利于控制沉降和结构受力。殷小亮<sup>[19]</sup>模拟了不同施工工法下地表沉降、洞室周围围岩变形和车站塑性区分布情况,研究表明初支拱盖法抑制围岩和地层表面变形的效果最佳。张子龙

等<sup>[20]</sup>研究了拱盖法施工过程中地表沉降和围岩应力的变化规律,得到拱盖法施工的力学特征并提出相应的优化措施。

从已有研究成果来看,对上软下硬大跨暗挖地铁车站施工的研究多集中于地表及围岩变形,且研究对象大多为车站的上部拱盖结构,对于围岩应力和变形区分布特征以及车站下部结构的研究较少。本文以大连地铁4号线东南山站为研究背景,通过MIDAS-GTS/NX有限元软件对大跨暗挖地铁车站拱盖法施工开展模拟,选取拱部跨中、大拱脚以及高边墙等多个围岩特征点,对施工过程中不同阶段的地表沉降、围岩变形、围岩塑性区及围岩最大主应力开展研究,明确拱盖法施工的力学效应,并通过Peck公式对地表沉降进行预测,验证在上软下硬地层采用拱盖法施工的可行性,为实际工程提供参考。

## 1 工程背景

### 1.1 工程概况

东南山站为大连地铁4号线第4座车站,位于虹城路以北由家村工业园区以南,顶板覆土厚为3.7~32.8 m,整个工程范围内地势东高西低,起伏较大。东南山站长为189 m,标准段宽为22.5 m,高为20.9 m,车站附属结构设置3个出入口、2组风亭,预留1个换乘通道。车站主体结构位于中风化石灰岩中,围岩等级为IV级,车站上覆层为素填土和强风化石灰岩,属于典型的上软下硬复合地层。

### 1.2 拱盖法支护概况

拱盖法通过大拱脚将上部结构载荷有效传递至下部坚硬稳定的围岩中,利用围岩自身的承载力和稳定性来保证整个结构的安全性。在拱盖结构完成初期支护并进行二次衬砌后,即可在拱盖结构的保护下快速进行下部结构的开挖与施工。

车站采用拱盖法施工。施工前在拱部120°位置处采用直径为42 mm、长为2.5 m的超前小导管进行注浆加固,边导洞拱脚处采用直径为22 mm、长为3 m的砂浆锚杆和直径为1 m、间距为2 m的人工挖孔灌注桩进行加固。初期支护采用厚度为350 mm和250 mm的C25混凝土,二次衬砌采用厚度为800~1 000 mm的C40钢筋混凝土。车站主体结构剖面见图1。

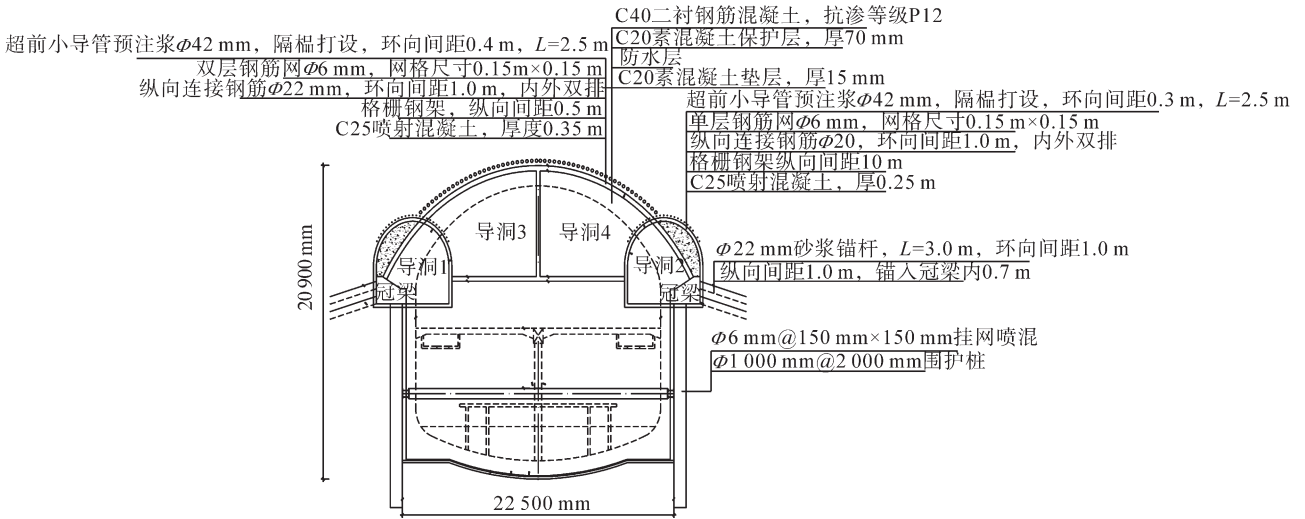


图 1 车站主体结构剖面

Fig.1 main structural section of the station

1.3 拱盖法施工步骤

与传统大跨浅埋暗挖施工工法相比,拱盖法施工的优点如下:①导洞数量少,施工工序简单,钻爆次数较少,对地层扰动较小;②支护较简单,临时支撑的拆除相对减少,有利于上部结构的稳定性;③拱部初期支护和二次衬砌施工完成后,在拱盖结构保护下可加快下部结构施工,保障施工安全。

结合东南山站地质工程条件优化施工过程,具体步骤如下:①超前预加固与边导洞开挖:车站主体结构正式施工前,先进行超前小导管注浆加固,然后开挖边导洞 1 和边导洞 2,及时采取初期支护措施;②边导洞围护结构与中导洞开挖:对边导洞内部进行围护桩、锚杆、冠梁施工,开

挖中导洞 3 和中导洞 4,及时进行初期支护;③临时支撑拆除与拱顶防水层施工:分段拆除边导洞与中导洞之间的临时支撑,依次铺设车站拱顶的防水层及二次衬砌混凝土结构;④下部结构土体开挖与侧墙初期支护:分层分段开挖车站下部结构至坑底设计高程,及时进行车站侧墙的初期支护施工;⑤下部结构底板及站台层结构施工:按顺序进行车站下部结构底板垫层、防水层、仰拱部位的二次衬砌施工,完成站台层结构立柱建设,安装综合接地设施;⑥侧墙防水层及整体结构闭合:继续进行车站下部结构侧墙的防水层及二次衬砌施工,完成车站结构中板、内部结构、轨面下的素混凝土回填作业。拱盖法施工过程示意图见图 2。

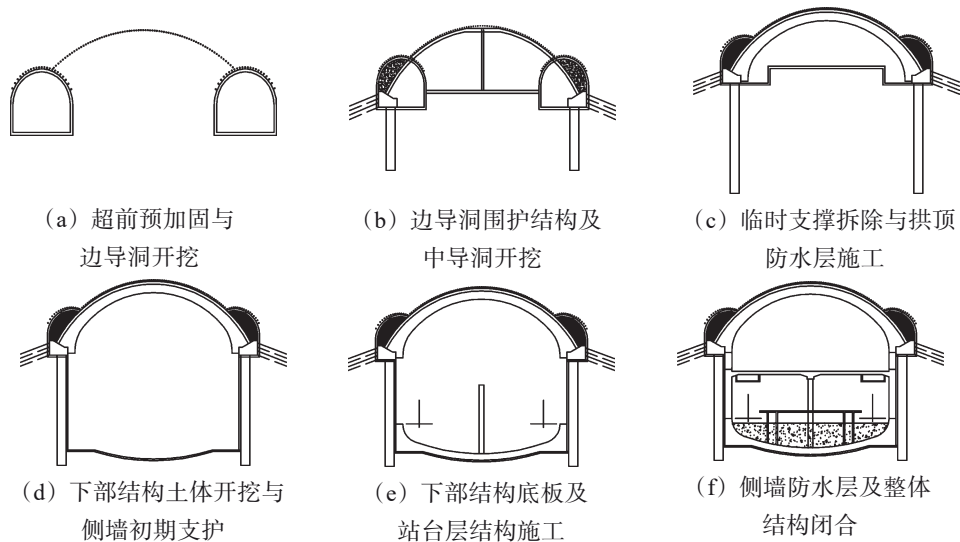


图 2 拱盖法施工过程示意

Fig.2 construction process of arch cover method

## 2 数值模型建立及 Peck 地表沉降预测

### 2.1 三维数值模拟

利用 MIDAS-GTS/NX 有限元软件对东南山站拱盖法施工全程进行数值模拟。为消除边界效应影响, 根据圣维南原理, 模型左右边界取车站开挖跨度的 3~5 倍, 下边界取开挖跨度的 2 倍, 上边界竖直向上取至地表。模型整体尺寸为长为 90 m、

宽为 40 m、高为 75 m, 车站、土层分别采用边长为 0.5 m、2 m 的网格, 模型共计 202 883 个节点和 213 975 个单元, 数值模型见图 3。模型地层参数符合摩尔-库伦准则, 岩层及材料参数见表 1。岩层、二次衬砌均采用实体单元, 初期支护采用板单元, 锚杆采用植入式桁架单元, 围护桩采用梁单元。边界约束采用位移约束, 模型上边界为自由面。

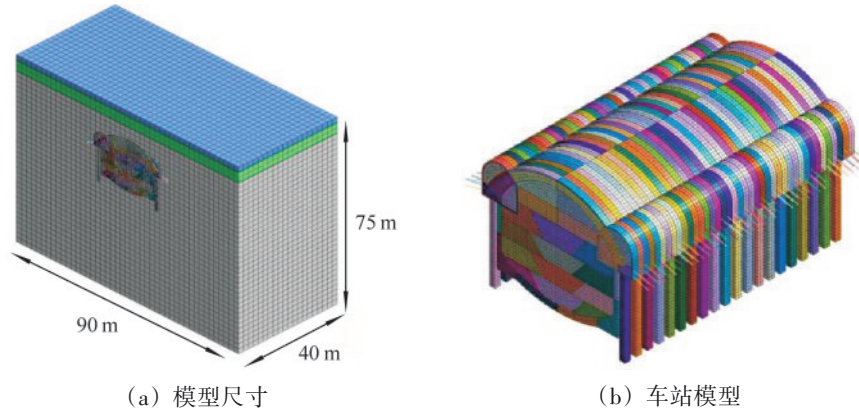


图 3 数值模型

Fig.3 numerical model

表 1 岩层及材料参数

Tab.1 rock and material parameters

土层或材料类别	弹性模量/MPa	泊松比	容重/(kN·m <sup>-3</sup> )	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
素填土	7.00×10 <sup>0</sup>	0.36	17.2	11	15
强风化石灰岩	1.00×10 <sup>3</sup>	0.25	24.1	74	30
中风化石灰岩	3.00×10 <sup>3</sup>	0.21	27.2	130	35
初期支护	2.00×10 <sup>4</sup>	0.20	24.0		
二次衬砌	3.25×10 <sup>4</sup>	0.20	25.0		
锚杆	2.08×10 <sup>5</sup>	0.30	78.5		
围护桩	2.00×10 <sup>3</sup>	0.20	25.0		

### 2.2 监测点布置

数值模拟时以模型中间断面为研究断面, 由车站中线向两侧每隔 10 m 布设 1 个地表沉降监测点, 在围岩与初期支护之间设置围岩特征监测点,

分别为拱脚外边缘角点 A、C、E、M、O、Q 和中点 B、D、N、P, 各主体导洞拱顶 H、J、F、L, 各导洞连接处中隔墙 I、G、K 和高边墙中点 R、S、T、U, 具体布置见图 4。

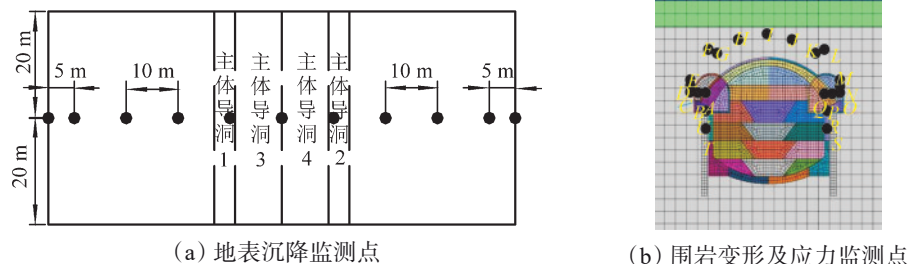


图 4 拟监测点布置

Fig.4 monitoring point layout

### 2.3 基于 Peck 修正公式预测地表沉降

Peck 经验公式是通过观测大量工程的地表沉降数据, 由 Gauss 方程演变而来的一种新的计算方法, 其计算式为

$$S(x) = S_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right), \quad (1)$$

$$S_{\max} = \frac{\eta\pi R^2}{i\sqrt{2\pi}}, \quad (2)$$

$$i = \frac{Z}{\sqrt{2\pi \tan(45^\circ - \varphi/2)}}, \quad (3)$$

式(1)~式(3)中:  $x$ 为监测点距隧道中心的水平距离, m;  $S(x)$ 为 $x$ 处的地表沉降值, mm;  $S_{\max}$ 为最大地表沉降值, mm;  $i$ 为沉降槽宽度, mm;  $R$ 为开挖半径, m;  $\eta$ 为地层损失率;  $\varphi$ 为岩土层的内摩擦角, °;  $Z$ 为地表距隧道中心的垂直高度, m。

基于 Peck 公式, 提出一种类似于正态分布的地表沉降横向分布曲线, 见图 5。

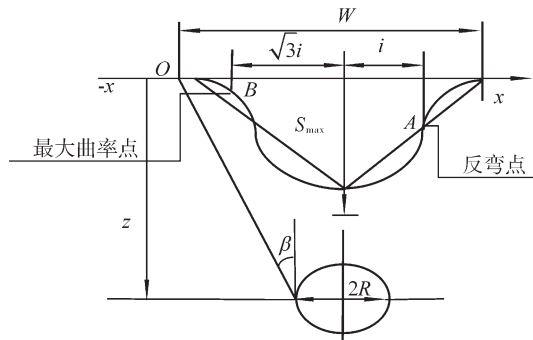


图 5 地表沉降横向分布

Fig.5 horizontal distribution of surface subsidence

## 3 数值模拟结果分析

为研究上软下硬地层大跨暗挖地铁车站拱盖法施工的力学效应, 对施工全程进行阶段划分, 如下: ①开挖边导洞 1; ②开挖边导洞 2; ③开挖中导洞 3; ④开挖中导洞 4; ⑤拱部初期支护; ⑥拆除临时支撑; ⑦拱部二次衬砌; ⑧开挖下部土体; ⑨下部结构初期支护; ⑩下部结构二次衬砌。

### 3.1 地表沉降

各施工阶段地表变形见图 6。由图 6 可知, 地表沉降随车站施工进度逐渐增大, 车站中线上方地表沉降最大, 地表沉降由车站中线向两侧逐渐

减小, 最终趋于稳定。车站中线两侧 0~36.5 m 内地表沉降变化显著, 再向外延伸地表沉降较小, 表明地表沉降受施工影响区域约为车站开挖跨度的 2 倍。由于开挖断面较小且初期支护施工及时, 边导洞开挖初期地表沉降较小。中导洞 3 开挖后地表沉降明显增大。中导洞 4 开挖后, 由于车站整体开挖断面达到最大值, 此时地表沉降增至 1.9 mm。临时支撑拆除使作用于支撑结构上的载荷转移至洞室围岩上, 围岩压力迅速增大, 导致地表沉降显著增大。拱部二次衬砌施工完成后, 车站下部结构施工时地表沉降无明显变化, 表明中导洞开挖和临时支撑拆除是引起地表沉降的关键, 施工时应加强对中导洞开挖和临时支撑拆除的监测力度, 防止地表产生过大沉降, 保障施工安全。

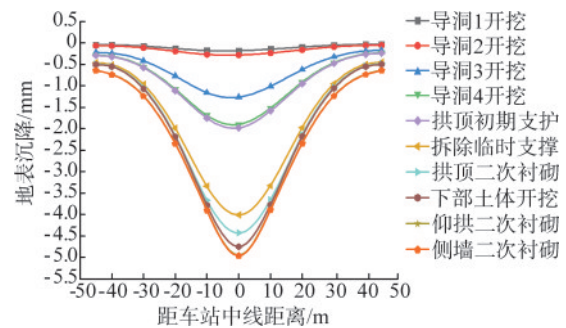


图 6 各施工阶段地表变形

Fig.6 surface deformation at each construction stage

### 3.2 围岩变形

#### (1) 围岩竖向位移

各施工阶段拱部跨中的竖向变形见图 7, 其中, 围岩竖向位移以向上为正, 向下为负。由图 7 可知, 车站施工全程, 拱部跨中围岩均发生沉降位移, 且在中导洞施工和临时支撑拆除过程中, 围岩位移变化最显著。边导洞施工时, 拱部跨中各特征点的竖向位移均较小, 特征点 H、I、J 的竖向位移小于特征点 F、G、K、L。中导洞施工和临时支撑拆除时, 跨中竖向位移均显著增大, 特征点 H、I、J 的竖向位移增幅明显大于特征点 F、G、K、L, 表明距离车站中线越近, 拱部跨中围岩的竖向位移越大。拱部二次衬砌施工完成后, 仅下部土体开挖会产生少量变形, 其余施工阶段竖向位移均无明显变化, 基本趋于稳定。

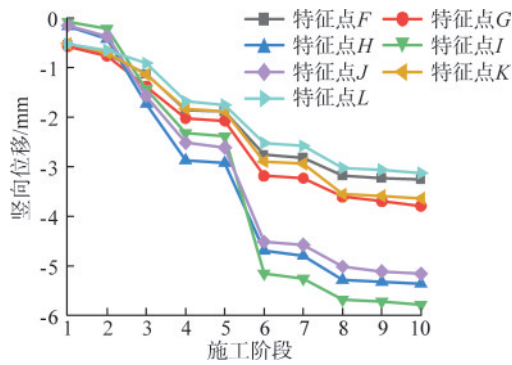


图 7 各施工阶段拱部跨中的竖向变形

Fig.7 vertical deformation of arch mid-span at each construction stage

各施工阶段拱部大拱脚的竖向变形见图 8。由图 8 可知, 拱部大拱脚竖向变形以沉降位移为主, 且左右两侧大拱脚竖向位移的变化趋势基本一致, 具有明显的对称性。车站施工全程, 大拱脚特征点 C、D、E、M、N、O 的变形与拱部跨中变形基本一致, 大拱脚处围岩位移小于拱部跨中位移。导洞施工初期, 拱脚底部特征点 A、B、P、Q 发生隆起位移且随导洞施工逐渐增大。临时支撑拆除后, 由于围岩失去临时支撑的约束作用, 载荷通过大拱脚传递至下部坚硬岩层中, 拱脚底部隆起位移逐渐减小, 隆起量减小至零后反向发生沉降位移。

各施工阶段高边墙的竖向变形见图 9。由图 9 可知, 高边墙竖向变形以隆起位移为主, 左右两侧高边墙位移的变化趋势基本一致, 具有明显的对称性。在中导洞施工、临时支撑拆除以及下部土体开挖过程中, 围岩位移变化显著。边导洞施工时, 高边墙发生隆起位移且位移较小。中导洞施工时, 高边墙隆起位移迅速增大, 最大值为 1.86 mm。临时支撑拆除后, 围岩压力骤增, 高边

墙隆起位移迅速减小至 0.25 mm。下部土体开挖时, 由于围岩的卸荷作用, 高边墙由隆起位移逐渐转变为沉降位移, 最大沉降位移为 0.48 mm, 远小于隆起位移。

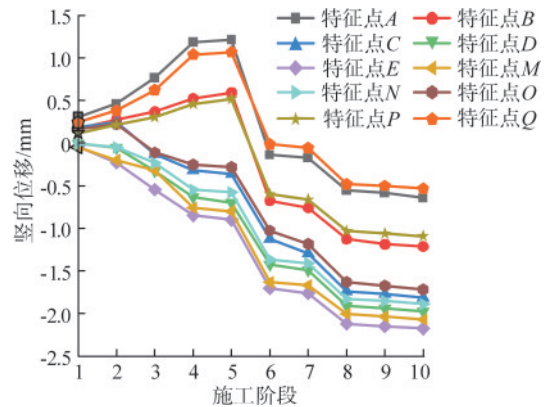


图 8 各施工阶段拱部大拱脚的竖向变形

Fig.8 vertical deformation of large arch foot at each construction stage

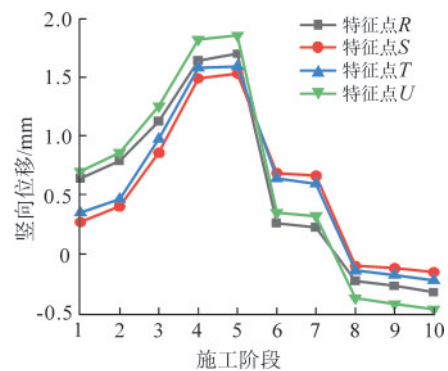
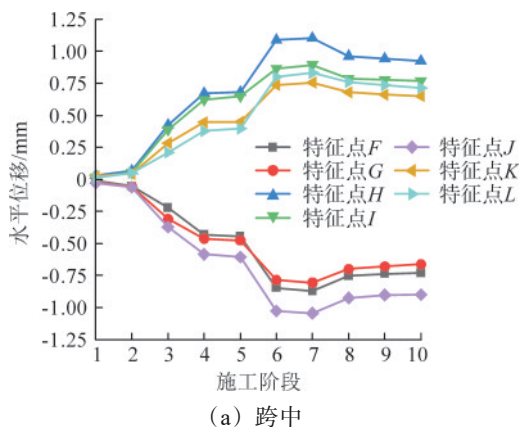


图 9 各施工阶段高边墙的竖向变形

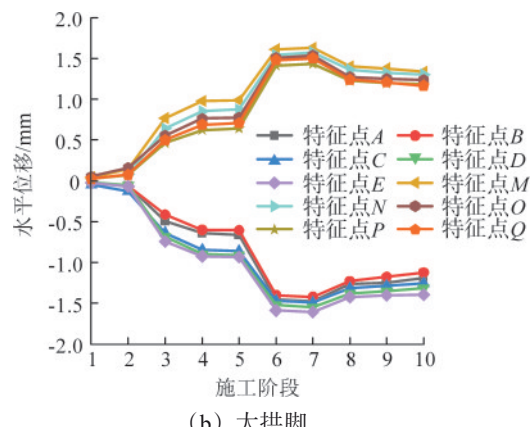
Fig.9 vertical deformation of high side wall at each construction stage

(2) 围岩水平位移

各施工阶段拱部的水平变形见图 10, 其中, 围岩水平位移以向右为正, 向左为负。



(a) 跨中



(b) 大拱脚

图 10 各施工阶段拱部的水平变形

Fig.10 horizontal deformation of arch at each construction stage

由图 10 可知,拱部围岩水平位移具有明显的对称性,且均在中导洞施工和临时支撑拆除时明显增大,其余施工阶段围岩水平位移无明显变化,较为稳定。导洞 3 拱顶特征点 *H* 向右移动,导洞 4 拱顶特征点 *J* 向左移动,表明拱部跨中有向隧道净空入侵的趋势。左拱脚特征点 *A*、*B*、*C*、*D*、*E* 向左移动,右拱脚特征点 *M*、*N*、*O*、*P*、*Q* 向右移动,表明拱部拱脚有向围岩入侵的趋势,整体来看,拱部跨中水平位移小于拱部大拱脚水平位移。

各施工阶段高边墙的水平变形见图 11。

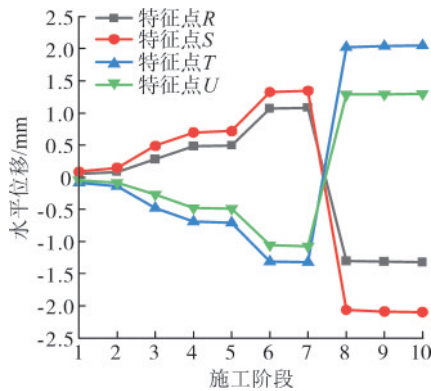


图 11 各施工阶段高边墙的水平变形

Fig.11 horizontal deformation of high side wall at each construction stage

由图 11 可知,高边墙水平位移具有明显对称性,在中导洞施工、临时支撑拆除以及下部土体开挖时,高边墙水平位移显著增大。高边墙在中导洞施工和临时支撑拆除时位移增量较小,在下部

土体开挖时位移增量较大。左侧高边墙特征点 *T*、*U* 在拱部施工时向左移动,下部土体开挖时,由于围岩的挤压作用,特征点 *T*、*U* 逐渐变成向右移动,表明车站拱部结构施工时高边墙有向围岩入侵的趋势,下部结构施工时高边墙有向隧道净空入侵的趋势。

### 3.3 围岩塑性区分布

典型施工阶段围岩塑性区分布见图 12。由图 12 可知,边导洞开挖过程中,围岩塑性区面积较小且主要集中分布于左右边导洞拱脚位置处。中导洞施工时,由于隧道拱部开挖断面达到最大值,围岩塑性区面积显著增大且集中分布于拱盖顶部以及左右边导洞拱脚位置处。临时支撑拆除后,由于失去临时支撑的约束作用,围岩压力迅速增大,围岩塑性区面积达到最大值。拱部二次衬砌施工后,围岩塑性区面积显著减小,表明二次衬砌结构对于维护拱部围岩的稳定具有积极作用。下部结构施工后,围岩塑性区主要集中分布于高边墙位置处,由于拱盖结构的保护和下部结构的及时支护,围岩塑性区面积较小。随着车站施工工序的进行,洞室围岩发生塑性松动,塑性区面积与作用位置不断变化。施工完成后,塑性区集中分布于下部结构高边墙位置处,因此,采用拱盖法施工时应及时进行下部高边墙的初期支护,同时,密切关注高边墙的塑性松动,做好监控测量工作。

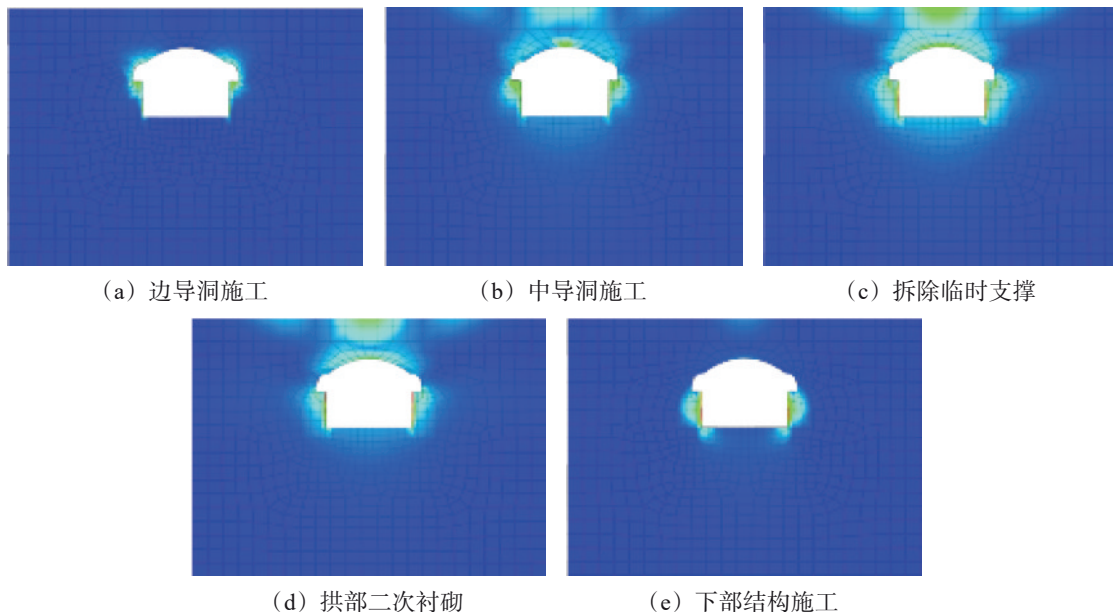


图 12 典型施工阶段围岩塑性区分布

Fig.12 distribution of surrounding rock plastic zone in typical construction stage

### 3.4 围岩最大主应力

各施工阶段拱部跨中主应力变化见图 13, 其中, 围岩应力以受拉为正, 受压为负。由图 13 可知, 拱部跨中围岩均受压, 中隔墙主应力较大, 拱顶主应力较小。中导洞拱顶特征点 *H*、*J* 的最大主应力小于边导洞拱顶特征点 *F*、*L*, 表明距离车站中线越近, 拱部跨中最大主应力越小。从施工全程来看, 导洞施工时, 中隔墙应力显著增大, 各导洞拱顶应力无明显变化。临时支撑拆除后, 各导洞拱顶应力显著增大, 中隔墙应力基本不变。下部结构施工对拱部跨中最大主应力的影响较小。

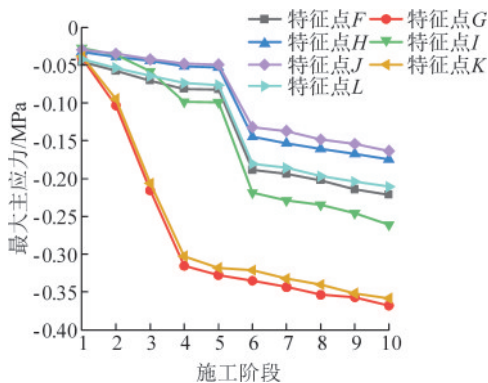


图 13 各施工阶段拱部跨中主应力变化

Fig.13 main stress variation at the mid span of the lower arch at each construction stage

各施工阶段拱部大拱脚主应力变化见图 14。由图 14 可知, 拱部拱脚围岩均受压, 左右两侧大拱脚位置处的最大主应力具有明显对称性。车站施工全程, 大拱脚处最大主应力仅在临时支撑拆除时显著增大, 其余施工阶段应力变化较小。大拱脚特征点 *C*、*O* 的最大主应力明显大于拱脚其余部位, 表明拱脚尖角部位存在应力集中现象。

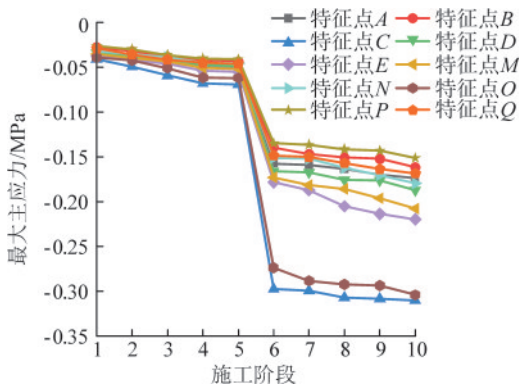


图 14 各施工阶段拱部大拱脚主应力变化

Fig.14 main stress variation of the arch foot at each construction stage

各施工阶段高边墙主应力变化见图 15。由图 15 可知, 高边墙围岩受压且具有明显的对称性。边导洞施工初期, 高边墙最大主应力较小, 随着导洞施工主应力缓慢增大, 导洞施工完成后, 高边墙最大主应力较小, 数值接近于 0。临时支撑拆除后, 高边墙应力显著增大, 最大为 0.19 MPa。下部土体开挖时, 由于围岩的卸荷作用, 高边墙最大主应力迅速减小, 土体开挖完成后高边墙最大主应力较小, 车站施工完成后应力仍有极小幅度增长。

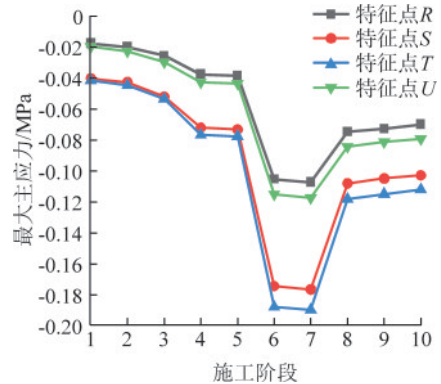


图 15 各施工阶段高边墙主应力变化

Fig.15 main stress variation of high side walls at each construction stages

### 4 数值模拟与监测数据对比分析

为验证有限元软件模拟地铁车站拱盖法施工的可靠性, 将模拟值与现场实测值进行对比, 见图 16 ~ 图 19。由图 16 ~ 图 19 可知, 地铁车站拱盖法施工围岩竖向位移、水平位移以及最大主应力的模拟值与实测值变化趋势基本一致, 地表沉降模拟曲线与 Peck 公式地表沉降预测曲线基本吻合, 整体略小于实测值, 表明 Peck 公式对于地表沉降的预测具有参考价值, 数值模拟较可靠, 在上软下硬复合地层地铁车站采用拱盖法施工具有一定的可行性。

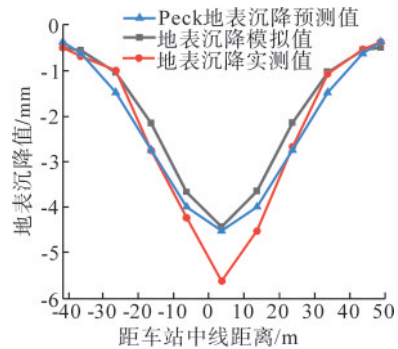


图 16 地表沉降模拟值与现场实测值对比

Fig.16 comparison between the simulated value of surface subsidence and the measured value on site

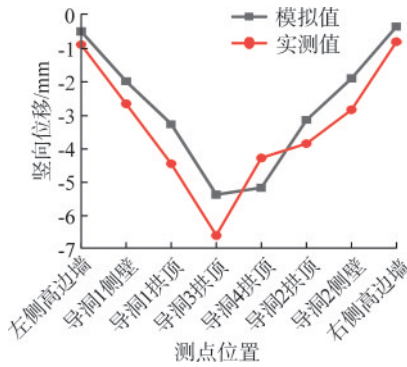


图 17 围岩竖向位移模拟值与现场实测值对比

Fig.17 vertical displacement simulation value of surrounding rock is compared with the field measured value

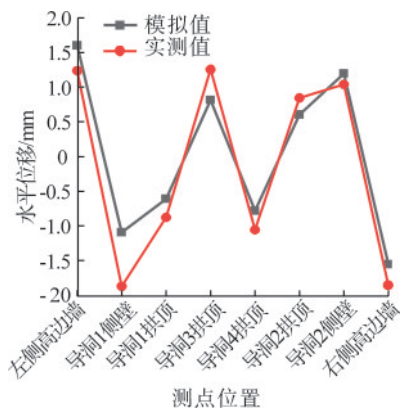


图 18 围岩水平位移模拟值与现场实测值对比

Fig.18 simulation value of horizontal displacement of surrounding rock is compared with the measured value in the field

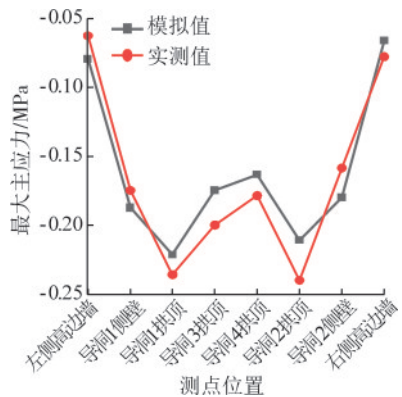


图 19 围岩最大主应力模拟值与现场实测值对比

Fig.19 maximum principal stress simulation value of surrounding rock is compared with the field measured value

### 5 结论

以大连地铁 4 号线东南山站为研究背景, 采用数值模拟和现场实测相结合的方法, 通过地表沉降、围岩变形、塑性区、最大主应力的变化规律研究拱盖法施工的力学效应, 得出如下结论。

(1) 地表沉降随车站施工逐渐增大, 车站中

线上方地表沉降最大, 地表沉降由车站中线向两侧逐渐减小, 最终趋于稳定。车站中线两侧 0 ~ 36.5 m 内地表沉降变化显著, 再向外延伸地表沉降较小。

(2) 拱部和高边墙围岩变形具有明显的对称性, 围岩最大主应力变化情况较复杂。拱部跨中围岩向隧道净空入侵, 拱脚向围岩入侵。距离车站中线越近, 拱部跨中最大主应力越小。拱脚尖角位置处存在应力集中现象。

(3) 车站施工过程中, 洞室围岩发生塑性松动, 且塑性区面积与作用位置不断变化。拱部二次衬砌有利于维护拱部围岩的稳定性。施工完成后, 塑性区主要集中分布于高边墙位置处。实际施工时应及时进行高边墙初期支护, 密切关注高边墙的塑性松动, 做好监控量测工作。

(4) Peck 公式能够较准确地预测地表沉降, 在上软下硬复合地层地铁车站采用拱盖法施工具有一定的可行性。

### 参考文献(References):

[1] 李文聪. 地铁车站中洞法施工地表沉降变形规律研究[J]. 现代隧道技术,2018,55(2):189-193.  
LI Wencong. On surface settlement during subway station construction using the center drift excavation method[J]. Modern Tunnelling Technology,2018,55(2):189-193.

[2] 刘加柱,孙礼超,张壮,等. 地铁车站PBA洞桩法施工力学效应研究[J]. 地下空间与工程学报,2018,14(增刊1):240-247,307.  
LIU Jiazhu, SUN Lichao, ZHANG Zhuang, et al. Study on mechanical effect of PBA method in metro station[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering2018,14(Suppl. 1): 240-247,307.

[3] 袁龙,何文社. 双侧壁导坑法在浅埋大断面黄土隧道中的应用[J]. 地下空间与工程学报,2022,18(增刊1):289-295.  
YUAN Long,HE Wenshe. Study on the application of double-side heading method in the construction of shallow and large section loess tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2022,18(Suppl. 1):289-295.

[4] 李义华,朱康康,李明宇,等. 粉质黏土地层管幕+CRD法施工地表变形规律分析:以郑州地铁3号线中州大道站出入口通道工程为例[J]. 隧道建设(中英文),2022,42(12):2148-2156.  
LI Yihua, ZHU Kangkang, LI Mingyu, et al. Surface deformation laws of silty clay strata induced by pipe roofing and cross diaphragm: a case study of a passageway project at portal of Zhongzhou avenue station on Zhengzhou metro line 3[J]. Tunnel Construction,2022,42(12):2148-2156.

[5] 刘维宁,沈艳峰,罗富荣. 北京地铁复八线车站施工对环境影响的预测与分析[J]. 土木工程学报,2000,33(4):47-50.  
LIU Weining, SHEN Yanfeng, LUO Furong, et al. Prediction and

- analysis of effects during construction of subway station(on Fu-Ba line in Beijing) on environment[J]. China Civil Engineering Journal,2000,33(4):47-50.
- [6] 苏志刚. PBA法地铁车站全过程沉降规律及控制优化研究[J]. 施工技术(中英文),2024,10(3):48-53,65.  
SU Zhigang. The whole process settlement law and control optimization of subway station by PBA method[J]. Construction Technology,2024,53(8): 48-53,65.
- [7] 丁文娟. 采用洞桩法施工的地铁车站导洞开挖所引起的群洞效应影响研究[D]. 北京:北京交通大学,2010:45-53.
- [8] 王文涛. PBA工法地铁车站导洞施工方案优化研究[D]. 北京:北京交通大学,2015:74-79.
- [9] 钟国. 地铁车站的一种新型暗挖施工工法:拱盖法[J]. 城市轨道交通研究,2012,15(8):145-148.  
ZHONG Guo. Arch-cover method: a new subsurface excavation construction for metro stations[J]Urban Mass Transit,2012,15(8): 145-148.
- [10] LEI M F, ZHAO C Y, JIA C J, et al. Study on the geological adaptability of the arch cover method for shallow-buried large-span metro stations[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2023,132:104897.
- [11] 魏志远,冯冀蒙,虞龙平. 地铁车站双层初期支护拱盖法施工过程中力学行为研究[J]. 现代隧道技术,2022,59(3):265-274.  
WEI Zhiyuan, FENG Jimeng, YU Longping. Study on the mechanical behavior of the the double-layer arch cover initial support during the construction of subway stations by arch-cover method[J]. Modern Tunnelling Technology,2022,59(3):265-274.
- [12] LIU X R, LIU Y Q, QU W B, et al. Internal force calculation and supporting parameters sensitivity analysis of side piles in the subway station excavated by Pile-Beam-Arch method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 56: 186-201.
- [13] 龚旭东. 处于上软下硬地层的青岛某地铁车站初支拱盖法施工变形规律及控制[J]. 城市轨道交通研究,2021,24(6):109-114.  
GONG Xudong. Deformation pattern and control of Qingdao metro station adopting primary arch cover construction method in upper soft and lower hard stratum[J]. Urban Mass Transit 2021,24 (6):109-114.
- [14] SHANG Y L, DU S J, HAN T Y, et al. Case study on deformation control of upper-soft and lower-hard large span tunnel station using combined control technology and monitoring demonstration[J]. Sains Malaysiana,2017,46(11):2091-2099.
- [15] 孔超,高新强,姚勇,等. 上软下硬复合地层初支拱盖法围岩变形与力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(增刊1): 2634-2644.  
KONG Chao, GAO Xinqiang, YAO Yong, et al. The deformation and mechanical properties of surrounding rock of primary support arch-cover construction method in upper-soft and lower-hard stratum[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2020,39(Suppl. 1):2634-2644.
- [16] LIU X R, LIU Y Q, YANG Z P, et al. Numerical analysis on the mechanical performance of supporting structures and ground settlement characteristics in construction process of subway station built by Pile-Beam-Arch method[J]. KSCE Journal of Civil Engineering,2017,21(5):1690-1705.
- [17] GUO X P, JIANG A N. Study on applicability of double layer superimposed primary support arch cover method for large-span station in upper soft and lower hard stratum[J]. KSCE Journal of Civil Engineering,2022,26(3):1407-1418.
- [18] WANG J B, HUO Q, SONG Z P, et al. Study on adaptability of primary support arch cover method for large-span embedded tunnels in the upper-soft lower-hard stratum[J]. Advances in Mechanical Engineering,2019,11(1):1-15.
- [19] 殷小亮. 辉绿岩侵入花岗岩地层条件下大跨度地铁车站暗挖施工方法比选[J]. 城市轨道交通研究,2023,26(7):159-164.  
YIN Xiaoliang. Comparative selection of large-span metro station underground-excavated construction method under diabase intrusion into granite formation condition[J]. Urban Mass Transit, 2023,26(7):159-164.
- [20] 张子龙,姜谱男,于海,等. 大跨度暗挖地铁车站拱盖法施工力学响应分析[J]. 现代隧道技术,2021,58(3):139-146.  
ZHANG Zilong, JIANG Annan, YU Hai, et al. Analysis of the mechanical response in the construction of large-span mined metro stations by the arch-cover method[J]. Modern Tunnelling Technology,2021,58(3):139-146.